



Faculté de Génie

Département de Génie Civil

**Caractérisation de liants cimentaires et des additions minérales et
évaluation de l'influence de leurs caractéristiques sur la
performance des Bétons Fluides à Rhéologie Adaptée (BFRA)**

Mémoire de maîtrise

Spécialité : génie civil

Abdoulaye Mahamat Ali

Jury : Prof. Ammar YAHIA (Directeur)
Prof. Arezki Tagnit-Hamou (Rapporteur)
Prof. Habib Mesbah (Examineur)
Dr. Mario Dupuis (Examineur)

Résumé

La fabrication des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA) nécessite une plus grande quantité de poudres, c.-à-d. ajouts cimentaires (AC) et adjuvants chimiques en comparaison avec les bétons conventionnels. Le remplacement partiel du ciment par des additions minérales est devenu une pratique très répandue dans l'industrie du béton visant l'amélioration de ses propriétés Rhéologiques et mécaniques. La caractérisation des poudres est un facteur important pour une sélection adéquate des ajouts cimentaires sans pour autant oublier le rôle des adjuvants chimiques (super plastifiants, SP et agents de viscosité, AV).

Dans cette étude, il s'agit de réaliser une caractérisation approfondie de la phase solide (ciment, ajouts cimentaires, additions minérales et liant alternatifs) au-delà de la caractérisation habituelle (finesse Blaine et distribution granulométrique), notamment en effectuant des mesures de la morphologie, mais aussi des indices d'écoulement pour évaluer la compressibilité, l'agglomération et la cohésion des poudres. Ces indices ont été rarement exploités pour comprendre l'effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA). Ensuite, il s'agit de comprendre les interactions entre les différents ajouts cimentaires et adjuvants chimiques, notamment l'effet des caractéristiques sur le taux d'absorption des adjuvants et de leur impact sur la rhéologie, pour pouvoir établir des corrélations entre ces caractéristiques d'écoulement et la rhéologie des suspensions à base de ciment. Sur la base des caractéristiques (indices de Carr, etc.) des poudres déterminées, il devient alors possible de classer les poudres en fonction de leur capacité à s'écouler et d'étudier leur comportement rhéologique dans des mortiers de béton équivalents (MBE) correspondant aux différents types de bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA). Dans cette étude, deux classes de BFRA sont étudiées : Les bétons semi-autoplaçant pour les constructions résidentiel et les béton semi-auto plaçant (BSAP) pour les infrastructures.

Les résultats obtenus montrent que :

- La dispersibilité des poudres est liée à la cohésion de la poudre. Plus la cohésion de la poudre est grande, plus faible sera la dispersibilité des poudres.
- Les indices d'écoulement ont montré que la poudre de verre, les cendres volantes, le laitier et la fumée de silice présentent une bonne dispersibilité et une bonne coulabilité.

- Le remplacement de ciment par de la poudre de verre pour un taux de remplacement de 15 à 25% diminue considérablement la cohésion par rapport à 100% de ciment GU. La plus grande diminution a été observée avec le taux de remplacement de 20%.
- L'efficacité des systèmes polycarboxylate et agents entraîneurs d'air (PC/AE) ou poly naphthalène et agents entraîneurs (PNS/AE) est fonction du type et des dosages utilisés. Elle est également fonction du type de BFRA, notamment le rapport Eau/Liant (E/L).
- La rétention de la fluidité dans le temps peut varier significativement d'une combinaison (SP/AE) à l'autre.
- La dispersibilité, la cohésion et le déferlement des poudres affectent la fluidité des mélanges incorporant la poudre de verre.
- Plus le temps d'écoulement T40 est faible, meilleur sera la fluidité du mélange incorporant la poudre de verre.
- Pour les MBE-SAP résidentiels incorporant la poudre de verre, au-delà de 60% de dispersibilité et 80 comme indice de déferlement, le blocage survient si l'efficacité du superplastifiant n'est pas très satisfaisante.
- La dispersibilité de la poudre de verre affecte le seuil de cisaillement des MBE-SAP résidentiel et d'infrastructure. Plus la dispersibilité de poudre est faible, plus le seuil de cisaillement diminue.
- La dispersibilité de la poudre de verre semble avoir une influence sur la résistance à la compression des mélanges binaire résidentiels et d'infrastructure. Cependant, plus la dispersibilité de la poudre de verre est importante, plus grande sera la résistance à la compression à jeune âge.

Mots clés :

Indices d'écoulement, compressibilité, agglomération, cohésion, morphologie, bétons fluides, ajouts cimentaires (AC), coulabilité, déferlement, superplastifiant, mortier de béton équivalent.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce modeste travail, j'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de recherche, le professeur Ammar Yahia pour sa disponibilité et son admirable attention tout au long de ce projet, ses conseils m'a été d'un apport inestimable et a eu un acquis pour moi comme une autorité affirmée. Son aide appréciable et ses conseils précieux ont nourri en profondeur ma réflexion et qui m'ont permis de mener ce projet à terme.

J'exprime mes sincères remerciements aux partenaires (Ministère des Transports du Québec, Ville de Montréal, Rütgers, Sika Canada, SNC-Lavalin, Euclid Canada, exp, et Hydro-Québec) de la Chaire de recherche industrielle du CRSNG sur le développement des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA) et leur utilisation dans les infrastructures en béton pour leur soutien financier. Les échanges que nous avons pu avoir au cours des réunions de la chaire étaient particulièrement enrichissants.

Je tiens également à adresser mes vifs remerciement aux membres de jury : le professeur Arezki Tagnit-Hamou (Rapporteur), le professeur Habib Mesbah (Examineur) et le docteur Mario Dupuis (Examineur), qui m'ont donné de leurs patiences et qui ont accepté d'évaluer ce modeste travail.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Je tiens enfin à remercier ma famille pour leur soutien et leurs encouragements.

Table des Matières

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 PROBLEMATIQUE.....	2
1.2 OBJECTIFS	2
CHAPITRE 2 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	3
2.1 INTRODUCTION	3
2.2 AJOUTS CIMENTAIRES.....	4
2.2.1 <i>Introduction</i>	4
2.2.2 <i>Influence des ajouts cimentaires sur les propriétés des bétons frais</i>	5
2.2.3 <i>Effet des ajouts cimentaires sur les propriétés Rhéologiques</i>	7
2.3 ADJUVANTS.....	9
2.3.1 <i>Les superplastifiants</i>	10
2.3.2 <i>Les agents entraineurs d'air</i>	11
2.4 LA VIBRATION	12
2.5 BETON AUTOPLAÇANT (BAP)	14
2.5.1 <i>Historique du BAP</i>	14
2.5.2 <i>Atouts des BAP par rapport au béton conventionnel vibré</i>	14
2.5.3 <i>Formulation du BAP</i>	15
2.5.4 <i>Caractérisation du BAP</i>	16
2.6 RHEOLOGIE DU BETON FRAIS.....	18
2.6.1 <i>Définition de la rhéologie</i>	18
2.6.2 <i>Concepts de base de la rhéologie</i>	18
2.6.3 <i>Paramètres rhéologiques</i>	19
2.6.4 <i>Comportement Rhéologique</i>	20
2.6.5 <i>Facteurs affectants la rhéologie du béton</i>	22
2.7 LA METHODE DE MORTIER DE BETON EQUIVALENT.....	22
2.8 INDICES DE CARR.....	23
2.8.1 <i>L'indice de coulabilité</i>	24
2.8.2 <i>L'indice de déferlement</i>	24
CHAPITRE 3 : PROGRAMME EXPERIMENTAL ET PROCEDURES D'ESSAIS.....	26
3.1 PLAN EXPERIMENTAL.....	26
3.2 MATERIAUX UTILISES.....	27

3.3	METHODOLOGIE	31
3.3.1	<i>Procédure de malaxage</i>	31
3.4	ESSAIS DE CARACTERISATIONS	32
3.5	CARACTERISATION DES POUDRES	33
3.5.1	<i>Densité</i>	34
3.5.2	<i>Compressibilité</i>	34
3.5.3	<i>Mesures des angles de talus (repos), de chute, de différence et de spatule</i>	35
3.5.4	<i>Cohésion</i>	35
3.5.5	<i>Dispersibilité</i>	36
3.5.6	<i>Caractérisation des bétons</i>	36
	Étalement et le temps d'écoulement (t40).....	36
	L'entonnoir en V (V-funnel)	37
	L'essai d'étalement à l'anneau (J-ring)	37
	Boîte en L (L-Box).....	38
	Teneur en air	40
	Tassement	40
	Rhéomètre ConTec 5	41
	Perméabilité aux ions de chlorure	42
	Résistance à la compression	42
3.5.7	<i>Caractérisation des MBE</i>	43
	Essai du mini-cône	43
	Le mini entonnoir en V (mini V-funnel)	43
	Teneur en air	44
	Rhéomètre ConTec 6	44
	Résistance à la compression	45
CHAPITRE 4 : CARACTERISATION DES CEMENTS, AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANT ALTERNATIFS		46
4.1	INTRODUCTION	46
4.2	OPTIMISATION DU PROTOCOLE D'ESSAIS	46
4.3	CARACTERISATION QUALITATIVE DES CEMENTS, AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANT ALTERNATIFS	47
4.4	CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES	48
4.4.1	<i>Ciment</i>	50
4.4.2	<i>Fumée de silice</i>	50
4.4.3	<i>Poudre de verre</i>	51
4.4.4	<i>Cendres volantes</i>	51
4.4.5	<i>Granulats fins</i>	52
4.4.6	<i>Gros granulats</i>	52

4.4.7	<i>Eau de gâchage</i>	54
4.5	MESURES DES INDICES DE CARR DES CIMENTS ET MATERIAUX CIMENTAIRES.....	54
4.5.1	<i>Mesures des angles</i>	54
4.5.2	<i>Mesures des densités apparentes et détermination de la compressibilité</i>	57
4.5.3	<i>Mesure de la cohésion</i>	59
4.5.4	<i>Mesure de la dispersibilité</i>	61
4.5.5	<i>Indices de Carr (coulabilité et déferlement)</i>	62
4.6	CARACTERISATION DES COMBINAISONS BINAIRES DES POUDRES	64
4.6.1	<i>Mesures des angles des poudres</i>	64
4.6.2	<i>Mesures des densités apparentes et détermination de la compressibilité des systèmes GU + PV</i> .	65
4.6.3	<i>Mesure de la dispersibilité et de la cohésion</i>	66
4.6.4	<i>Détermination des Coulabilité et déferlement des poudres binaires</i>	67
4.7	CONCLUSIONS.....	68
CHAPITRE 5 : OPTIMISATION DES FORMULATIONS DE BFRA DE REFERENCE.....		70
5.1	TYPES DES BFRA.....	70
5.2	PARAMETRES DE FORMULATION DES BFRA	70
5.3	FORMULATIONS DES BFRA OPTIMISEES	73
5.4	PRESENTATION DES RESULTATS DES BFRA ETUDIES	75
5.5	PROPRIETES DES BSAP RESIDENTIELS	79
5.5.1	<i>Étalements</i>	79
5.5.2	<i>Étalement à l'anneau (J-ring)</i>	81
5.5.3	<i>L'entonnoir en V (V-funnel) et temps d'écoulement (T40)</i>	82
5.5.4	<i>Capacité de passage dans L-box</i>	84
5.5.5	<i>Tassements</i>	86
5.5.6	<i>Viscosité plastique et seuil de cisaillement</i>	87
5.5.7	<i>Resistance à la compression</i>	88
5.6	BETON SEMI-AUTOPLAÇANT POUR L'INFRASTRUCTURE	90
5.6.1	<i>Étalements</i>	90
5.6.2	<i>Étalement à l'anneau (J-ring)</i>	92
5.6.3	<i>Entonnoir en V (V-funnel) et le temps d'écoulement (T40)</i>	93
5.6.4	<i>Capacité de passage dans le L-box</i>	95
5.6.5	<i>Tassements</i>	97
5.6.6	<i>Viscosité plastique et seuil de cisaillement</i>	98
5.6.7	<i>Résistance à la compression</i>	99
5.7	CONCLUSIONS.....	101

CHAPITRE 6 : EFFET DES CARACTERISTIQUES DES POUDRES SUR LA RHEOLOGIE DES BFRA104

6.1	INTRODUCTION	104
6.2	TYPES DES MBE.....	104
6.3	FORMULATION DES MBE CORRESPONDANT.....	104
6.4	PRESENTATION DES RESULTATS SUR LES MBE	106
6.4.1	<i>Mini étalement</i>	113
6.4.2	<i>Rétention de la fluidité</i>	114
6.4.3	<i>T40 du MBE</i>	114
6.4.4	<i>Temps d'écoulement à travers le mini V-funnel</i>	115
6.4.5	<i>Seuil de cisaillement</i>	116
6.4.6	<i>Viscosité plastique</i>	117
6.4.7	<i>Résistance à la compression</i>	118
6.5	CORRELATION ENTRE LES RESULTATS DE MBE RESIDENTIELLES ET LES INDICES D'ÉCOULEMENT DES POUDRES	120
6.5.1	<i>Étalement et dispersibilité de poudre de verre</i>	120
6.5.2	<i>Étalement et cohésion de poudre de verre</i>	121
6.5.3	<i>Étalement et déferlement de poudre de verre</i>	121
6.5.4	<i>Rétention de la fluidité et dispersibilité de la poudre de verre</i>	122
6.5.5	<i>Rétention de la fluidité et coulabilité de poudre de verre</i>	123
6.5.6	<i>Rétention de la fluidité et déferlement de poudre de verre</i>	124
6.5.7	<i>Temps d'écoulement T40 et dispersibilité de poudre de verre</i>	125
6.5.8	<i>Temps d'écoulement T40 et déferlement de la poudre de verre</i>	126
6.5.9	<i>Temps d'écoulement à travers le V-funnel et la dispersibilité de la poudre de verre</i>	126
6.5.10	<i>Temps d'écoulement à travers le V-funnel et le déferlement de la poudre de verre</i>	127
6.5.11	<i>Seuil de cisaillement et la dispersibilité de la poudre de verre</i>	128
6.5.12	<i>Seuil de cisaillement et la coulabilité de la poudre de verre</i>	129
6.5.13	<i>Seuil de cisaillement et déferlement de poudre de verre</i>	129
6.5.14	<i>Viscosité et dispersibilité de poudre de verre</i>	130
6.5.15	<i>Résistance à la compression et déferlement de la poudre de verre</i>	131
6.5.16	<i>Mini-étalement</i>	132
6.5.17	<i>Rétention de la fluidité</i>	133
6.5.18	<i>T40 du MBE</i>	134
6.5.19	<i>Temps d'écoulement à travers le mini V-funnel</i>	134
6.5.20	<i>Seuil de cisaillement</i>	135
6.5.21	<i>Viscosité plastique</i>	136
6.5.22	<i>Résistance à la compression</i>	137

6.6	CORRELATION ENTRE LES RESULTATS DE MBE POUR L'INFRASTRUCTURE ET LES INDICES D'ÉCOULEMENT DES POUDRES.....	138
6.6.1	Étalement et dispersibilité de poudre de verre	139
6.6.2	Étalement et le déferlement de la poudre verre	139
6.6.3	Rétention de la fluidité et la dispersibilité de la poudre verre	140
6.6.4	Temps d'écoulement, T40 et la dispersibilité de la poudre verre.....	141
6.6.5	Temps d'écoulement, T40 et le déferlement de la poudre verre	142
6.6.6	Temps d'écoulement à travers le V-funnel et la dispersibilité de la poudre de verre	143
6.6.7	Temps d'écoulement à travers le V-funnel et le déferlement de la poudre de verre	144
6.6.8	Seuil de cisaillement et la dispersibilité de la poudre de verre	145
6.6.9	Seuil de cisaillement et la coulabilité de la poudre de verre	146
6.6.10	Seuil de cisaillement et le déferlement de la poudre de verre	147
6.6.11	Viscosité et la dispersibilité de la poudre de verre.....	148
6.6.12	Résistance a la compression et la dispersibilité de poudre de verre	149
CHAPITRE 7 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		151
7.1	PHASE 1 : CARACTERISATION DES CEMENTS, AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANTS ALTERNATIFS	151
7.2	PHASE 2 : OPTIMISATION DES FORMULATIONS DE BFRA DE REFERENCE	152
7.3	PHASE 3 : EFFET DES CARACTERISTIQUES DES POUDRES SUR LA RHEOLOGIE DES BFRA	154
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		156

Liste de figures

FIGURE 2.1 : MODE DE RECUPERATION DU VERRE EN FONCTION DE SA COULEUR [TAGNIT-HAMOU ET TOGNONVI 2013]	5
FIGURE 2.2 : EFFET DU TAUX DE REMPLACEMENT MASSIQUE DES CENDRES VOLANTES SUR LE SEUIL DE CISAILEMENT [SZECZY, 1997] .	7
FIGURE 2.3 : EFFET DU TAUX DE REMPLACEMENT MASSIQUE DES CENDRES VOLANTES SUR LA VISCOSITE PLASTIQUE [SZECZY, 1997]....	8
FIGURE 2.4 : EFFET DU REMPLACEMENT DE LA FUMEE DE SILICE SUR LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DU BETON [GJORV, 1991]	9
FIGURE 2.5 : REPRESENTATION DES PARTICULES DE CIMENT FLOECULES ET DISPERSES [AÏTCIN, 2001]	10
FIGURE 2.6 : COMPARAISON DES QUALITES DE BETON [SOTOMAYOR CRUZ, 2012]	12
FIGURE 2.7 : SERRAGE DU BETON PAR VIBRATION INTERNE	13
FIGURE 2.8 : AIGUILLE VIBRANTE A MOTEUR ELECTRIQUE	13
FIGURE 2.9 : COMPOSITION D'UN BETON ORDINAIRE ET D'UN BAP [TURCRY, 2004]	15
FIGURE 2.10 : RELATION ENTRE L’AFFAISSEMENT ET L’ETALEMENT DES BETONS FLUIDES [KHAYAT,1999].....	16
FIGURE 2.11 : PROFIL DE VITESSE POUR UN ECOULEMENT DE CISAILEMENT SIMPLE D'UN LIQUIDE NEWTONIEN ENTRE DEUX PLANS. LE PLAN SUPERIEUR EST EN MOUVEMENT A VITESSE V CONSTANTE [HUANG, 2006].....	18
FIGURE 2.12 : SEUIL DE CISAILEMENT DYNAMIQUE (τ_0) [ROUIS, 2017].....	19
FIGURE 2.13 : SEUIL DE CISAILEMENT STATIQUE (τ_s) [WALLEVIK, 2003].	20
FIGURE 2.14 : MODELES RHEOLOGIQUES COURAMMENT UTILISES EN RHEOLOGIE [AÏSSOUN, 2015]	21
FIGURE 2.15 : FORMATION D’HYDRATES A LA SURFACE DES GRANULATS [ACKER, 1988]	23
FIGURE 2.16 : PASSAGE DE BETON AU MORTIER DE BETON EQUIVALENT (MBE) [ERDEM ET COLL., 2009].	23
FIGURE 2.17 : SCHEMA DE CALCUL DES INDICES DE CARR [CARR, 1965].....	25
FIGURE 3.1 : ORGANIGRAMME DU PLAN EXPERIMENTAL	28
FIGURE 3.2 : ADJUVANTS ETUDIES DANS LA PHASE 2.....	30
FIGURE 3.3 : ADJUVANTS SELECTIONNES POUR REALISER LES TRAVAUX DE LA PHASE 3.....	31
FIGURE 3.4 : MALAXEUR MONARCH (A) POUR BETON ET GROS HOBART (B) POUR MBE	32
FIGURE 3.5 : RECAPITULATIF DES ESSAIS DE CARACTERISATION	33
FIGURE 3.6 : L’APPAREIL HOSOKAWA.....	34
FIGURE 3.7 : ESSAI D'ETALEMENT POUR BSAP	37
FIGURE 3.8 : L'ENTONNOIR EN V (V-FUNNEL).....	37
FIGURE 3.9 : J-RING AVEC 8 BARRES POUR LE BSAP	38
FIGURE 3.10 : L-BOX A 2 BARRES POUR BSAP	39
FIGURE 3.11 : COLONNE DE TASSEMENT DE BSAP	40

FIGURE 3.12 : RHEOMETRE CONTEC 5 POUR BETONS	41
FIGURE 3.13 : ESSAI DU MINI-CONE POUR MBE	43
FIGURE 3.14 : MINI ENTONNOIR EN V (V-FUNNEL) POUR MBE	44
FIGURE 3.15 : MINI AIR-METRE POUR MORTIER	44
FIGURE 3.16 : RHEOMETRE CONTEC 6 A CYLINDRES COAXIALES POUR MORTIERS	45
FIGURE 4.1 : GRANULOMETRIE DES CIMENTS ET DES AJOUTS CIMENTAIRES UTILISES	49
FIGURE 4.2 : PHOTO DES GRAINS DES DEUX CIMENTS TERC ³ (A) ET GU (B) PAR MEB	50
FIGURE 4.3 : PHOTO DES GRAINS DE FUMEE DE SILICE PAR MEB	50
FIGURE 4.4 : PHOTO DES GRAINS DE LA POUDRE DE VERRE PAR MEB	51
FIGURE 4.5 : PHOTO DES GRAINS DE CENDRE VOLANTE PAR MEB	51
FIGURE 4.6 : COURBE GRANULOMETRIQUE DU SABLE	52
FIGURE 4.7 : COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA PIERRE 5-10 MM.....	53
FIGURE 4.8 : COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA PIERRE 5-14 MM.....	53
FIGURE 4.9 : COURBE GRANULOMETRIQUE DE LA PIERRE 10-20 MM.....	54
FIGURE 4.10: MESURES DE DIFFERENTS ANGLES DES CIMENTS	55
FIGURE 4.11 : MESURES DE DIFFERENTS ANGLES DE LA FUMEE DE SILICE, DE LAITIER ET DE CENDRE VOLANTE/C.....	55
FIGURE 4.12 : MESURES DE DIFFERENTS ANGLES DE LA CENDRE VOLANTE/F, DE LA POUDRE DE VERRE ET DU METAKAOLIN.....	56
FIGURE 4.13 : MESURES DE DIFFERENTS ANGLES DES FILLERS CALCAIRES	56
FIGURE 4.14 : COMPRESSIBILITE DES CIMENTS	58
FIGURE 4.15 : COMPRESSIBILITE DES AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANTS ALTERNATIFS	59
FIGURE 4.16 : COHESION DES CIMENTS	60
FIGURE 4.17 : COHESION DES AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANTS ALTERNATIFS	61
FIGURE 4.18 : DISPERSIBILITE DES CIMENTS.....	62
FIGURE 4.19 : DISPERSIBILITE DES AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANTS ALTERNATIFS.....	62
FIGURE 4.20 : VALEURS DE COULABILITE ET DEFERLEMENT DES CIMENTS	63
FIGURE 4.21 : COULABILITE ET DEFERLEMENT DES AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANTS ALTERNATIFS.....	64
FIGURE 4.22: MESURES DE DIFFERENTS ANGLES DES COMBINAISONS BINAIRES	65
FIGURE 4.23 : COMPRESSIBILITE ET DENSITE APPARENTE DES SYSTEMES GU + PV.....	66
FIGURE 4.24: MESURES DE DISPERSIBILITE ET COHESION DES SYSTEMES GU + PV.....	67
FIGURE 4.25 : MESURE DE COULABILITE ET DEFERLEMENT DE POUDRE BINAIRE	68
FIGURE 5.1 : ÉTALEMENT DES BSAP RESIDENTIELS (E/L = 0,50).....	80

FIGURE 5.2 : ÉTALEMENT DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,55$)	81
FIGURE 5.3 : CAPACITE DE PASSAGE DES BSAP-RESIDENTIELS ($E/L = 0,50$)	82
FIGURE 5.4 : CAPACITE DE PASSAGE DES BSAP-RESIDENTIELS ($E/L = 0,55$)	82
FIGURE 5.5 : VARIATION DES TEMPS D'ÉCOULEMENT A TRAVERS LE V-FUNNEL (TV) ET T40 DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,50$) ...	83
FIGURE 5.6 : VARIATION DES TEMPS D'ÉCOULEMENT A TRAVERS LE V-FUNNEL (TV) ET T40 DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,55$) ...	84
FIGURE 5.7 : CAPACITE DE PASSAGE DANS LE L-BOX DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,50$)	85
FIGURE 5.8 : CAPACITE DE PASSAGE DANS L-BOX DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,55$)	85
FIGURE 5.9 : TASSEMENTS TOTAL DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,50$)	86
FIGURE 5.10 : TASSEMENTS TOTAL DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,55$)	86
FIGURE 5.11 : VISCOSITE PLASTIQUE ET SEUIL DE CISAILEMENT DES BSAP-RESIDENTIELS ($E/L = 0,50$)	87
FIGURE 5.12 : VISCOSITE PLASTIQUE ET SEUIL DE CISAILEMENT DES BSAP-RESIDENTIELS ($E/L = 0,55$)	88
FIGURE 5.13 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BSAP RESIDENTIELS ($E/L = 0,50$)	89
FIGURE 5.14 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BSAP-RESIDENTIELS ($E/L = 0,55$) A 1, 3, 7, 28 ET 56 JOURS.....	90
FIGURE 5.15 : ÉTALEMENT DES BSAP DESTINES POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,38$).....	91
FIGURE 5.16 : ÉTALEMENT DES BSAP DESTINES POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,40$).....	92
FIGURE 5.17 : CAPACITE DE PASSAGE DES BSAP DESTINES POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,38$)	93
FIGURE 5.18 : CAPACITE DE PASSAGE DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,40$)	93
FIGURE 5.19 : VARIATION DES TEMPS D'ÉCOULEMENT A TRAVERS LE V-FUNNEL (TV) ET T40 DES BSAP DESTINES POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,38$)	94
FIGURE 5.20 : VARIATION DES TEMPS D'ÉCOULEMENT TV ET T40 DE BSAP DESTINES POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,40$)	95
FIGURE 5.21 : CAPACITE DE PASSAGE DANS L-BOX DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE.....	96
FIGURE 5.22 : CAPACITE DE PASSAGE DANS L-BOX DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE.....	96
FIGURE 5.23 : TASSEMENTS TOTAL DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,38$)	97
FIGURE 5.24 : TASSEMENTS TOTAL DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,40$)	98
FIGURE 5.25 : VISCOSITE PLASTIQUE ET SEUIL DE CISAILEMENT DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE	99
FIGURE 5.26 : VISCOSITE PLASTIQUE ET SEUIL DE CISAILEMENT DES BSAP DESTINE POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,40$)	99
FIGURE 5.27 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,38$)	100
FIGURE 5.28 : RESISTANCE A LA COMPRESSION DES BSAP POUR L'INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,40$)	101
FIGURE 6.1 : MINI-ETALEMENT APRES 10 MIN DES MBE RESIDENTIELS.....	113
FIGURE 6.2 : RETENTION DE LA FLUIDITE ENTRE 10 ET 40 MIN DES MBE RESIDENTIELS.....	114
FIGURE 6.3 : TEMPS D'ÉCOULEMENT (T40) DES MBE RESIDENTIELS BINAIRE	115

FIGURE 6.4 : TEMPS D'ÉCOULEMENT A TRAVERS LE MINI-V FUNNEL DES MBE RESIDENTIEL BINAIRE.....	116
FIGURE 6.5 : SEUIL DE CISAILLEMENT DES MBE RESIDENTIELS BINAIRE	117
FIGURE 6.6 : VISCOSITE PLASTIQUE DES MBE RESIDENTIELS	118
FIGURE 6.7 : RESISTANCE A LA COMPRESSION ($f'c$) A 1 JOUR DES MBE-SAP RESIDENTIELS	119
FIGURE 6.8 : RESISTANCE A LA COMPRESSION ($f'c$) A 3 JOURS DES MBE-SAP RESIDENTIELS.....	119
FIGURE 6.9 : CORRELATION ENTRE LE MINI ETALEMENT DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	120
FIGURE 6.10 : CORRELATION ENTRE LE MINI ETALEMENT DES MBE RESIDENTIELS ET LA COHESION DE POUDRE DE VERRE	121
FIGURE 6.11 : CORRELATION ENTRE LE MINI-ETALEMENT DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	122
FIGURE 6.12 : CORRELATION ENTRE LA RETENTION DE LA FLUIDITE ENTRE 10 ET 40 MIN DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	123
FIGURE 6.13 : CORRELATION ENTRE LA RETENTION DE LA FLUIDITE ENTRE 10 ET 40 MIN DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LA COULABILITE DE LA POUDRE DE VERRE	124
FIGURE 6.14 : CORRELATION ENTRE LA RETENTION DE LA FLUIDITE ENTRE 10 ET 40 MIN DES MBE RESIDENTIELS ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	125
FIGURE 6.15 : CORRELATION ENTRE TEMPS D'ÉCOULEMENT T40 DES MBE RESIDENTIELS ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	125
FIGURE 6.16 : CORRELATION ENTRE TEMPS D'ÉCOULEMENT T40 DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	126
FIGURE 6.17 : CORRELATION ENTRE LE TEMPS D'ÉCOULEMENT A TRAVERS LE MINI-V-FUNNEL DES MBE RESIDENTIELS ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	127
FIGURE 6.18 : CORRELATION ENTRE LE TEMPS D'ÉCOULEMENT MINI-V-FUNNEL DES MBE RESIDENTIELS ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	128
FIGURE 6.19 : CORRELATION ENTRE LE SEUIL DE CISAILLEMENT DES MBE RESIDENTIELS ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	128
FIGURE 6.20 : CORRELATION ENTRE LE SEUIL DE CISAILLEMENT DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LA COULABILITE DE LA POUDRE DE VERRE	129
FIGURE 6.21 : CORRELATION ENTRE LE SEUIL DE CISAILLEMENT DE MBE RESIDENTIEL BINAIRE (GU/PV) ET DEFERLEMENT DE POUDRE DE VERRE.....	130
FIGURE 6.22 : CORRELATION ENTRE LA VISCOSITE PLASTIQUE DES MBE RESIDENTIELS ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	131
FIGURE 6.23 : CORRELATION ENTRE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION ($f'c$) A 1 JOUR DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	131

FIGURE 6.24 : CORRELATION ENTRE LA RESISTANCE EN COMPRESSION ($F'c$) A 3 JOUR DES MBE-SAP RESIDENTIELS ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	132
FIGURE 6.25 : MINI-ETALEMENT APRES 10 MIN DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE	133
FIGURE 6.26 : RETENTION DE LA FLUIDITE ENTRE 10 ET 40 MIN DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE	133
FIGURE 6.27 : TEMPS D'ECOULEMENT T40 DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE	134
FIGURE 6.28 : TEMPS D'ECOULEMENT A TRAVERS LE MINI-V FUNNEL DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE	135
FIGURE 6.29 : SEUIL DE CISAILLEMENT DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE.....	136
FIGURE 6.30 : VISCOSITE PLASTIQUE DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE (SYSTEMES BINAIRES)	137
FIGURE 6.31 : RESISTANCE A LA COMPRESSION ($F'c$) A 1 JOUR DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE	138
FIGURE 6.32 : RESISTANCE A LA COMPRESSION ($F'c$) A 3 JOURS DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE.....	138
FIGURE 6.33 : CORRELATION ENTRE LE MINI-ETALEMENT DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE.....	139
FIGURE 6.34 : CORRELATION ENTRE LE MINI-ETALEMENT DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE.....	140
FIGURE 6.35 : CORRELATION ENTRE LA RETENTION DE LA FLUIDITE ENTRE 10 ET 40 MIN DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	141
FIGURE 6.36 : CORRELATION ENTRE LE TEMPS D'ECOULEMENT T40 DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	142
FIGURE 6.37 : CORRELATION ENTRE LE TEMPS D'ECOULEMENT T40 DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	143
FIGURE 6.38 : CORRELATION ENTRE LE TEMPS D'ECOULEMENT A TRAVERS LE MINI-V-FUNNEL DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	144
FIGURE 6.39 : CORRELATION ENTRE LE TEMPS D'ECOULEMENT A TRAVERS LE MINI-V-FUNNEL DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE.....	145
FIGURE 6.40 : CORRELATION ENTRE LE SEUIL DE CISAILLEMENT DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	146
FIGURE 6.41 : CORRELATION ENTRE LE SEUIL DE CISAILLEMENT DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LA COULABILITE DE LA POUDRE DE VERRE	147
FIGURE 6.42 : CORRELATION ENTRE LE SEUIL DE CISAILLEMENT DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	148
FIGURE 6.43 : CORRELATION ENTRE LA VISCOSITE DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LA DISPERSIBILITE DE LA POUDRE DE VERRE	149

FIGURE 6.44 : CORRELATION ENTRE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (F'_c) A 1 JOUR DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	150
FIGURE 6.45 : CORRELATION ENTRE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (F'_c) A 3 JOUR DES MBE-SAP POUR L'INFRASTRUCTURE ET LE DEFERLEMENT DE LA POUDRE DE VERRE	150

Liste de Tableaux

TABLEAU 2.1 : MODELES RHEOLOGIQUES DE SUSPENSIONS [FERRARIS, 1999]	21
TABLEAU 3.1: LIANTS CIMENTAIRES ET LIANTS ALTERNATIFS.....	27
TABLEAU 3.2 : PROPRIETES PHYSIQUES DES ADJUVANTS CHIMIQUES UTILISES	29
TABLEAU 3.3 : ESTIMATION DU BLOCAGE A TRAVERS J-RING SELON LA NORME ASTM C1621.....	38
TABLEAU 3.4 : CAPACITE DE REMPLISSAGE DES BSAP EN FONCTION DU TEMPS DE VIBRATION POUR UN TAUX DE REMPLISSAGE DE 80%	39
TABLEAU 3.5 : PROTOCOLE DE MESURE SUIVI POUR LES BSAP	41
TABLEAU 3.6 : NIVEAU DE PENETRABILITE AUX IONS CHLORE TIREES DE LA NORME ASTM C1202	42
TABLEAU 3.7: PROTOCOLE DE MESURE SUIVI POUR LES MBE-SAP	45
TABLEAU 4.1 : PROTOCOLES D’ESSAIS OPTIMISES.....	47
TABLEAU 4.2 : IDENTIFICATION ET PROPRIETES PHYSIQUES DES DIFFERENTS AJOUTS CIMENTAIRES ET LIANTS ALTERNATIFS	48
TABLEAU 4.3 : COMPOSITION CHIMIQUE DES CEMENTS	49
TABLEAU 4.4 : PROPRIETES PHYSIQUES DES GRANULATS.....	52
TABLEAU 4.5 : VALEURS DES DENSITES DES CEMENTS	57
TABLEAU 4.6: VALEURS DES DENSITES DES LIANTS ET LIANTS ALTERNATIFS	57
TABLEAU 5.1 : PARAMETRES DE FORMULATION ET PROPRIETES VISEES DU BSAP RESIDENTIEL	71
TABLEAU 5.2 : PARAMETRES DE FORMULATION ET PROPRIETES VISEES DU BSAP POUR LES INFRASTRUCTURES	72
TABLEAU 5.3 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE BSAP RESIDENTIEL (E/L = 0,50)	73
TABLEAU 5.4 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE BSAP RESIDENTIEL (E/L = 0,55)	74
TABLEAU 5.5 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE BSAP INFRASTRUCTURES (E/L = 0,38)	74
TABLEAU 5.6 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE BSAP INFRASTRUCTURES (E/L = 0,40)	75
TABLEAU 5.7 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DE BSAP RESIDENTIEL (E/L = 0,50)	76
TABLEAU 5.8 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES BSAP RESIDENTIELS (E/L = 0,55)	76
TABLEAU 5.9 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES BSAP RESIDENTIELS (E/L = 0,50)	77
TABLEAU 5.10 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES BSAP RESIDENTIELS (E/L = 0,55)	77
TABLEAU 5.11 : PROPRIETES DES FORMULATIONS DE BSAP OPTIMISEES POUR LES INFRASTRUCTURES	78
TABLEAU 5.12 : PROPRIETES DES FORMULATIONS DE BSAP OPTIMISEES POUR LES INFRASTRUCTURES	78
TABLEAU 5.13 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES BSAP OPTIMISES POUR LES INFRASTRUCTURES	79
TABLEAU 5.14 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES BSAP OPTIMISES POUR LES INFRASTRUCTURES	79
TABLEAU 6.1 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE MBE RESIDENTIEL (E/L = 0,50)	105

TABLEAU 6.2 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE MBE RESIDENTIEL ($E/L = 0,55$)	105
TABLEAU 6.3 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE MBE-BSAP- INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,38$).....	105
TABLEAU 6.4 : FORMULATIONS OPTIMISEES DE MBE-BSAP- INFRASTRUCTURE ($E/L = 0,40$).....	106
TABLEAU 6.5 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-BSAP RESIDENTIELS DE REFERENCE	106
TABLEAU 6.6 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-BSAP RESIDENTIELS SIMULE.....	107
TABLEAU 6.7 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-BSAP RESIDENTIELS FORMULES AVEC UN LIANT BINAIRE (GU + CV).....	107
TABLEAU 6.8 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-BSAP RESIDENTIELS FORMULES AVEC LE LIANT BINAIRE (GU + PV).....	108
TABLEAU 6.9 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-BSAP RESIDENTIELS DE REFERENCE.....	108
TABLEAU 6.10 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-BSAP RESIDENTIELS SIMULE.....	108
TABLEAU 6.11 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-BSAP RESIDENTIELS FORMULES AVEC LE LIANT BINAIRE (GU + CV)....	109
TABLEAU 6.12 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-BSAP RESIDENTIELS FORMULES AVEC LE LIANT BINAIRE (GU + PV)....	109
TABLEAU 6.13 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-BSAP INFRASTRUCTURE DE REFERENCE	109
TABLEAU 6.14 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-SAP INFRASTRUCTURE SIMULE (70% GU + 25% CV + 5% FS)	110
TABLEAU 6.15 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-BSAP POUR LES INFRASTRUCTURES LIANTS BINAIRE GU + CV	110
TABLEAU 6.16 : PROPRIETES DES FORMULATIONS OPTIMISEES DES MBE-BSAP POUR LES INFRASTRUCTURES LIANTES BINAIRE GU + PV	111
TABLEAU 6.17 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-BSAP DE REFERENCE POUR LES INFRASTRUCTURES	111
TABLEAU 6.18 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-BSAP DE REFERENCE SIMULEE POUR LES INFRASTRUCTURES	111
TABLEAU 6.19 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-BSAP POUR LES INFRASTRUCTURES LIANTS BINAIRE GU + CV	112
TABLEAU 6.20 : RESISTANCES A LA COMPRESSION DES MBE-SAP POUR LES INFRASTRUCTURES LIANT BINAIRE GU + PV	112

Chapitre 1: Introduction

L'utilisation des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA), tel que le béton autoplaçant (BAP), ne cesse d'augmenter grâce à leurs multiples avantages, notamment flexibilité dans les formes complexes, l'utilisation des ferraillages denses, le court délai de construction, etc. Cependant, le manque de connaissance du comportement à l'état frais de cette classe de béton a fait apparaître plusieurs problèmes comme le blocage lors de l'écoulement, pressions sur les parois des coffrages, ségrégation, etc. Une étude est alors menée sur la caractérisation des poudres utilisées dans la fabrication des BFRA, notamment les indices d'écoulement (coulabilité, déferlement) des poudres sèches pour comprendre l'effet de leurs caractéristiques sur la rhéologie des BFRA.

Étant donné l'importance de la propriété autoplaçante des BFRA, ces recherches se sont d'abord naturellement tournées vers la caractérisation des poudres sèches afin de juger ou non d'une pertinence à appréhender leur comportement en suspension et donc de pouvoir évaluer rapidement de l'avantage d'incorporer les ajouts cimentaires dans une composition de BFRA. Par exemple, la morphologie des particules est une propriété importante connue pour influencer leur écoulement en suspension. En effet, la forme et l'aspect de surface jouent un rôle prépondérant lors de l'écoulement d'une suspension. Peu ou pas utilisés pour la caractérisation des matériaux de cimentaires, ces essais d'écoulement des poudres sèches sont très employés dans les industries de la pharmacologie travaillant avec des matériaux fins. Ces essais permettent de rendre compte de la cohésion de la poudre, ou alors de caractériser la nature et la vitesse de d'écoulement de la poudre, propriété connue pour influencer l'écoulement en suspension.

Cette étude est divisée en trois phases. Dans la première phase, nous allons effectuer une caractérisation approfondie des poudres grâce notamment à l'appareil Hosokawa Powder tester. Dans la deuxième phase, il s'agit d'optimiser les formulations de BFRA incorporant différents types de superplastifiant et agents entraîneur d'air. Les BFRA étudiés sont le béton semi-autoplaçant résidentiel et le semi-autoplaçant pour les infrastructures. En fin, dans la troisième phase, nous allons étudier l'effet des caractéristiques des poudres (des poudres caractérisées dans la Phase 1) sur la rhéologie des mortiers de béton équivalents (MBE).

1.1 Problématique

Les exigences de plus en plus élevées des concepteurs et donneurs d'ouvrages ont conduit à des avancées technologiques importantes dans le domaine du béton durant les dernières années, donnant naissance aux bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA), notamment le béton auto plaçant (BAP). L'optimisation du squelette granulaire peut se faire par l'addition de particules fines et d'ajouts cimentaires à base de sous-produits industriels et de fillers. Cette approche a, cependant, conduit à des formulations dont le comportement rhéologique est imprévisible (rhéofluidifiant, rhéoépaississant, etc.). En effet, des problèmes de blocage de l'écoulement dans les conduites de pompage (écoulements bouchon), les problèmes de redémarrage du pompage après un temps d'arrêt prolongé, le phénomène de ségrégation et la faiblesse de l'interface pendant la mise en place par multicouches sont observés. Ces problèmes sont attribués à une mauvaise compréhension du comportement rhéologique et de son évolution dans le temps des BFRA. La rhéologie des BFRA est encore mal comprise et les mécanismes physico-chimiques affectant ce comportement sont mal identifiés. Elle dépend des paramètres de formulation, tels que le volume de pâte, le type, la taille et la morphologie des particules, finalement, la présence des ajouts cimentaires et d'adjuvants. Une bonne compréhension de l'effet des caractéristiques des liants (ciments, ajouts cimentaires et fillers) et leurs interactions avec les adjuvants sur la rhéologie de la matrice cimentaire est essentielle pour maîtriser la formulation et la mise en œuvre des BFRA.

1.2 Objectifs

L'objectif général de ce projet de recherche est de comprendre l'effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des BFRA. Les objectifs spécifiques de l'étude sont :

- Caractériser les liants cimentaires et les additions minérales.
- Évaluer l'impact des caractéristiques (i.e. morphologie, coulabilité, déferlement, etc.) des poudres sur les performances des MBE, notamment la rhéologie et son évolution dans le temps et la résistance à la compression à jeune âge.
- Évaluer les interactions entre les différents liants et adjuvants et leurs impacts sur la rhéologie et le comportement à l'écoulement des BFRA étudiés.

Chapitre 2 : Revue bibliographique

2.1 Introduction

Ces dernières années, les tendances architecturales beaucoup plus complexes et des formes plus vertigineuses ont donné naissance aux bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA). Cette classe de BFRA a pu satisfaire aux exigences des constructions modernes (formes complexes, ferrailage dense, court délai de construction, meilleures conditions de travail). Cependant, l'emploi des bétons fluides s'est accompagné de nouveaux défis, tels que le blocage lors de l'écoulement, la ségrégation et les pressions sur les parois des coffrages [Khayat et coll., 2002 ; Koehler et coll., 2008 ; Khayat et coll., 2007 ; Billberg, 2007]. La clé pour confronter ces défis est de générer des connaissances sur le comportement à l'état frais des bétons fluides afin de pouvoir maîtriser leurs propriétés rhéologiques. Par ailleurs, il est bien admis que la fabrication des bétons fluides nécessite une grande quantité de poudres, c.-à-d. ajouts cimentaires (AC), et d'adjuvants chimiques en comparaison avec les bétons conventionnels. Le remplacement partiel du ciment par des additions minérales est devenu une pratique très répandue dans l'industrie du béton visant l'amélioration des propriétés du béton. La caractérisation des poudres devient ainsi un facteur important pour mieux comprendre leurs caractéristiques influant et assurer ainsi une sélection adéquate des ajouts cimentaires sans pour autant oublier le rôle des adjuvants chimiques (superplastifiants, SP et agents de viscosité, AV).

L'incorporation des ajouts cimentaires, comme le laitier de haut fourneau, la poudre de verre, les cendres volantes, le métakaolin et la fumée de silice dans la formulation du béton, comme substituant du ciment, peut apporter beaucoup de changements sur le plan rhéologique (ouvrabilité, déformabilité et stabilité). L'influence de ces ajouts est étroitement dépendante de leur caractéristique physique et compatibilité avec les adjuvants. Ces ajouts présentent un défi réel de compatibilité entre eux et les adjuvants chimiques, notamment le superplastifiant (SP). Ceci est d'autant plus important du fait que la mise en place, le développement microstructural des bétons ainsi que leurs propriétés mécaniques et de durabilité sont étroitement liés au contrôle de leurs propriétés rhéologiques.

2.2 Ajouts cimentaires

2.2.1 Introduction

Les ajouts cimentaires sont des sous-produits provenant de différentes industries. De nos jours, l'utilisation des sous-produits minéraux est en train de devenir un devoir national et un impératif économique dans certains pays [Manai, 2012]. L'incorporation de ces matériaux tels que les cendres volantes, la fumée de silice, les fillers calcaires, le laitier de haut fourneau ou encore le métakaolin, comme substituts du ciment s'avère le moyen le plus facile et efficace pour diminuer les émissions en CO₂ liées à la fabrication du clinker [Rouis, 2017]. De plus, l'utilisation des ajouts minéraux dans la fabrication du béton présente plusieurs avantages comme l'amélioration de l'ouvrabilité et de la durabilité [Rouis, 2017]. Généralement, les ajouts minéraux utilisés sont des pouzzolanes, c'est-à-dire des matériaux à grande surface spécifique qui présentent des structures amorphes [Lea, 1938]. Avec la chaux et en présence d'eau, ils donnent des composés hydratés suivant une réaction exothermique à condition que le niveau d'énergie libre au départ soit suffisamment élevé pour aboutir à un système plus stable ayant des propriétés hydrauliques [Prince, 1987]. L'utilisation des ajouts cimentaires présente des avantages à plusieurs niveaux. Non seulement la réaction pouzzolanique permet d'améliorer certaines propriétés du béton en formant des produits plus résistants (C-S-H), mais aussi l'utilisation d'ajouts minéraux réduit la quantité de ciment utilisé, donc la quantité d'émission de CO₂. On utilise généralement dans le béton les ajouts minéraux suivants :

- La poudre de verre,
- Les cendres volantes,
- La fumée de silice,
- Le laitier de haut-fourneau,
- Les fillers calcaires,
- Le métakaolin,

2.2.2 Influence des ajouts cimentaires sur les propriétés des bétons frais

a) La poudre de verre

La poudre de verre (PV) est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue par broyage des fragments de verre coloré. Elle a une propriété pouzzolanique grâce à sa teneur élevée en SiO_2 (environ 70%) [Taha et al, 2008 ; Shao et al, 2000]. La figure 2.1 présente les différents modes de récupération du verre et les applications possibles de l'utilisation du verre dans le béton [Tagnit-Hamou et Tognonvi 2013]. L'influence de la poudre de verre (PV) sur l'ouvrabilité des bétons frais dépend de plusieurs facteurs. Selon Zidol, il s'avère que la poudre de verre avec une finesse semblable à celle du ciment soit une valeur optimale pour l'obtention d'une ouvrabilité acceptable [Zidol, 2009]. De plus, il est rapporté que la demande en superplastifiant diminue à mesure que le pourcentage de remplacement du ciment par la poudre de verre augmente [Zidol, 2009]. L'absorption quasi nulle de la poudre de verre constitue un facteur de diminution du dosage de SP adéquate pour un étalement donné. Par ailleurs, Schwarz et coll. trouvent que la poudre de verre augmente l'affaissement du béton par rapport au béton témoin pour un rapport $E/L = 0,40$ [Schwarz et coll, 2008b].

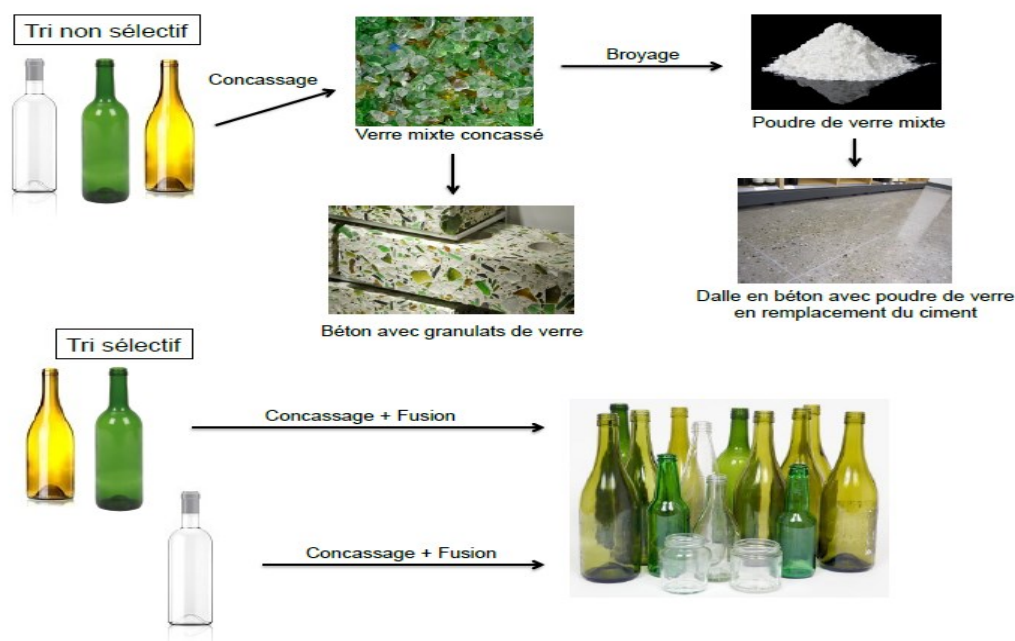


Figure 2.1 : Mode de récupération du verre en fonction de sa couleur [Tagnit-Hamou et Tognonvi 2013]

b) Les cendres volantes

Les cendres volantes utilisées dans le béton sont produites dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté. Au moment de la combustion, les impuretés, et une petite partie de carbone contenu dans le charbon ne peuvent être brûlées et se fusionnent pour former les cendres volantes [Manai, 1995]. Elles sont ensuite refroidies très rapidement et se solidifient sous forme de petites sphères. La grosseur des particules se situe environ entre 1 et 100 μm . La densité des cendres volantes se situe, en moyenne, entre 2,20 et 2,80 mg/m^3 et leur surface spécifique entre 400 et 700 m^2/kg [Kosmatka *et al*, 2003 ; ACI, 1996 ; Tagnit-Hamou, 1995]. Selon leur provenance, les cendres volantes produites seront différentes, tant au niveau physique que chimique [Carette et Malhotra, 1987]. La norme ASTM C-618-80 regroupe les cendres volantes en deux grandes classes suivant leur composition chimique :

- La classe F riche en oxyde ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$) avec une teneur faible en chaux ($\text{CaO} < 10\%$). Elle est qualifiée de silicoalumeneuse avec un faible potentiel pouzzolanique.
- La classe C riche en chaux ($\text{CaO} > 10\%$) et une teneur en oxyde supérieur à 50 %. Elle est qualifiée de silicocalcaire avec un potentiel pouzzolanique élevé.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'influence des cendres volantes sur les propriétés du béton frais. Selon Venuat, les cendres volantes agissant par leur finesse, leur forme, leur état de surface et leur faible masse volumique, améliorent l'ouvrabilité des bétons [Venuat, 1976]. Owens et Dhir attribuent l'amélioration de l'ouvrabilité aux surfaces lisses des cendres volantes [Owens et Dhir, 1979].

c) La fumée de Silice

La fumée de silice est un sous-produit de la fabrication du silicium ou du ferrosilicium. Elle se présente sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de 0,1 μm . La fumée de silice se caractérise par une structure vitreuse avec une teneur en silice élevée [Khayat et Aitcin, 1991 ; Manai, 1995]. D'une manière générale, l'utilisation de la fumée de silice (FS) peut améliorer la maniabilité tant qu'elle est utilisée à de faibles taux de

remplacement, mais elle peut aussi réduire la maniabilité quand elle est utilisée avec des taux élevés. Selon Bache, les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons : physique, physico chimique et pouzzolanique [Bache, 1981]. L'action physique consiste à libérer l'eau qui se trouve entre les particules de ciment, ce qui fluidifie le béton. L'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores, ce qui rend le béton imperméable, alors que l'action pouzzolanique permet, en réagissant très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation, de produire de CSH, ce qui permet des gains de résistance importants.

2.2.3 Effet des ajouts cimentaires sur les propriétés Rhéologiques

a) Les cendres volantes (CV)

En termes de rhéologie, les cendres volantes réduisent le seuil de cisaillement, mais elles ont un effet variable sur la viscosité plastique. Tattersall a montré que l'utilisation des cendres volantes dans le béton, conduit à une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique [Tattersall, 1991]. Par ailleurs, Szecsy (1997) a trouvé qu'un remplacement de 10% massique, de ciment par les cendres volantes dans le béton entraîne une augmentation du seuil de cisaillement. À des taux de remplacement de 10 à 20%, l'utilisation des CV réduit le seuil de cisaillement (Figure 2.2). L'utilisation de 5% de CV conduit à une réduction de la viscosité plastique. Cependant, un remplacement supérieur à 20% entraîne une faible augmentation de la viscosité plastique (Figure 2.3).

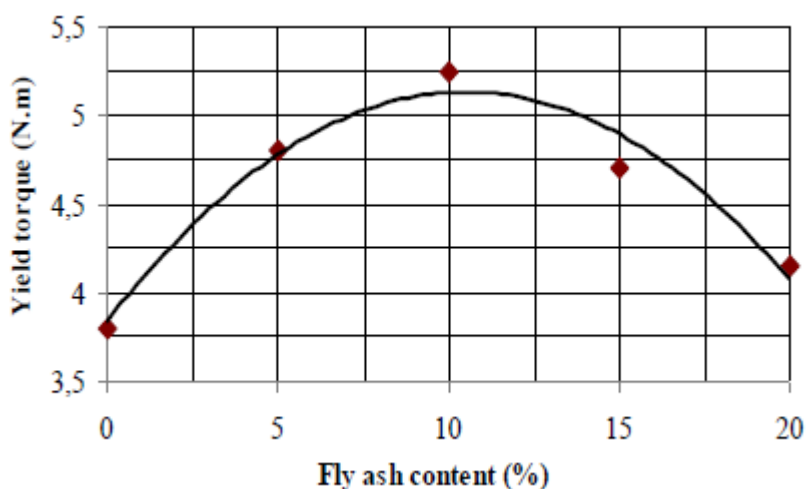


Figure 2.2 : Effet du taux de remplacement massique des cendres volantes sur le seuil de cisaillement [Szecsy, 1997]

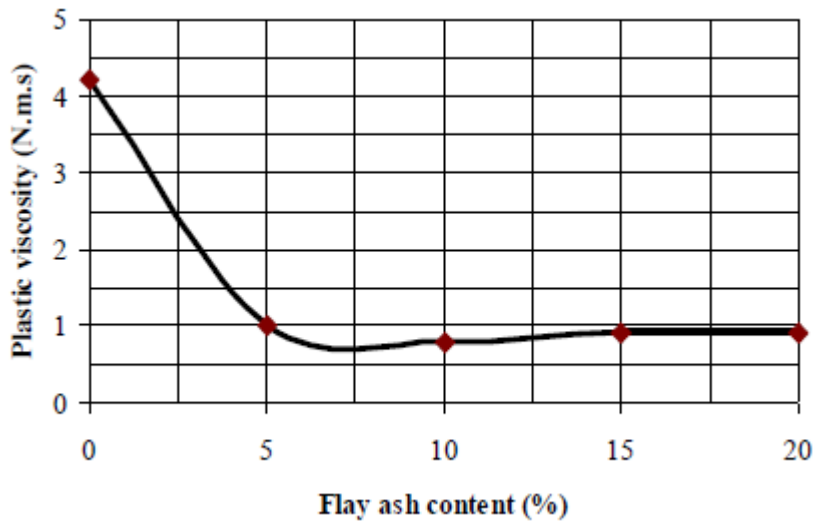


Figure 2.3 : Effet du taux de remplacement massique des cendres volantes sur la viscosité plastique [Szecsy, 1997]

b) Fumée de silice

Selon Tattersall et Mork, il existe un seuil de remplacement de la fumée de silice dans le béton, de sorte que si le taux de remplacement est en dessous de ce seuil, la viscosité plastique du béton diminue avec un faible changement dans le seuil cisaillement. Au-delà de ce seuil de remplacement, le seuil d'écoulement et la viscosité plastique augmentent significativement avec l'augmentation du taux de remplacement [Tattersall, 1991 ; Mork, 1996]. Selon les études de Juvas et de Gjorv, le remplacement partiel du ciment par de la fumée de silice entraîne une meilleure dispersion des particules, en diminuant ainsi la viscosité plastique mais sans grande influence sur le seuil d'écoulement τ_0 . Cela reste vrai tant que la teneur de la fumée de silice reste inférieure à une valeur seuil qui dépend de la teneur en ciment [Juvas 1990 et Gjorv, 1991] (Figure 2.4).

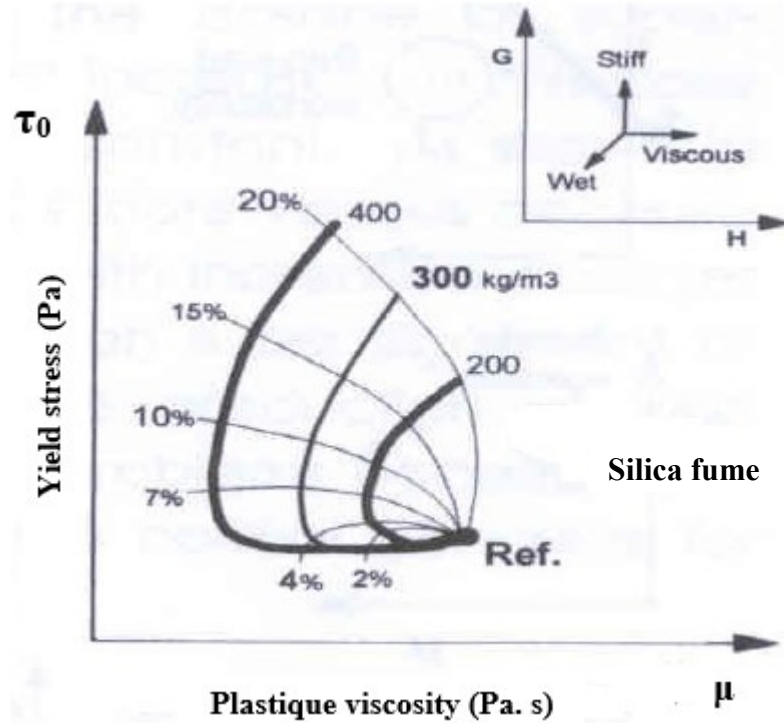


Figure 2.4 : Effet du remplacement de la fumée de silice sur le comportement rhéologique du béton [Gjorv, 1991]

2.3 Adjuvants

Un adjuvant est un ingrédient autre que l'eau, les granulats ou le ciment portland que l'on ajoute au mélange immédiatement avant ou pendant le malaxage pour améliorer certaines qualités du béton [ASTM C-125-79b]. Les adjuvants peuvent être classés selon leur fonction [Manai, 1995] :

- Les réducteurs d'eau,
- Les superplastifiants,
- Les entraîneurs d'air,
- Les retardateurs de prise,
- Les accélérateurs de prise,

- Les adjuvants divers (agent de viscosité ou agents colloïdaux ; les agents réducteurs de retrait ; agent d'adhérence, etc.)

2.3.1 Les superplastifiants

Les superplastifiants sont des produits chimiques qui ajoutés au béton permettent de réduire sa teneur en eau jusqu'à 30% (super réducteur d'eau) [Coll., 1981 ; Jin pan, 2011]. Les avantages principaux de l'utilisation des superplastifiants sont :

- La production de béton de haute ouvrabilité.
- La production d'un béton de haute résistance avec une faible teneur en eau.

Les superplastifiants permettent d'éviter l'agglomération des particules de ciment et de libérer l'eau emprisonnée dans les agglomérats (Figure 2.5). La défloculation et la dispersion des grains de ciment sont directement liées à l'adsorption des superplastifiants à la surface des particules.

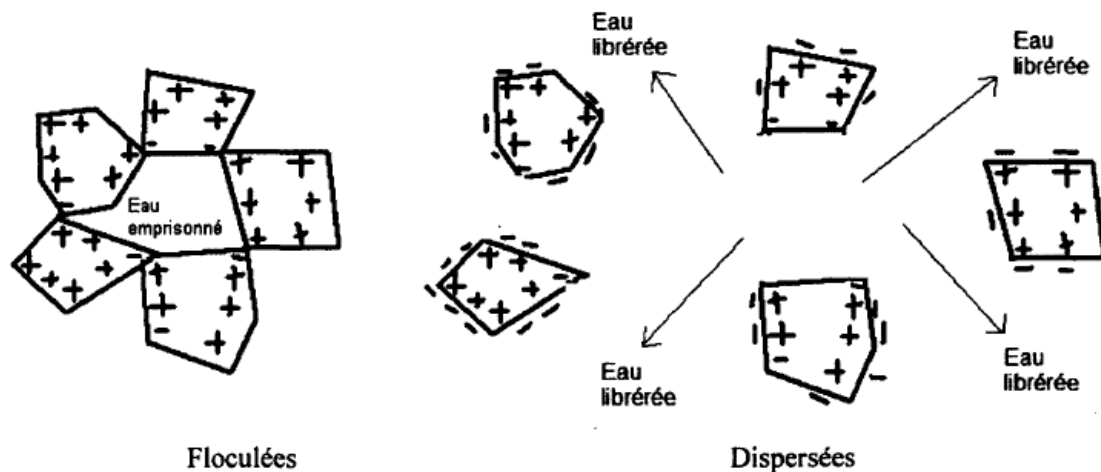


Figure 2.5 : Représentation des particules de ciment floculés et dispersés [Aïtcin, 2001]

Les superplastifiants augmentent l'affaissement du béton, mais cette capacité d'augmentation dépend de plusieurs facteurs notamment :

- La température : pour une température supérieure à 30°C, l'efficacité du superplastifiant diminue [Manai, 1995].

- Le type de superplastifiant.
- Le moment de l'addition du superplastifiant : si le superplastifiant est ajouté au début avec l'eau de malaxage, l'affaissement augmente ; Par contre, si le superplastifiant est ajoutée entre 5 et 50 minutes après le début du malaxage, l'augmentation de l'affaissement sera moindre [Jin pan, 2011].
- Le rapport E/C.
- Le type et la teneur en Ciment.

2.3.2 Les agents entraineurs d'air

Les agents entraineur d'air sont des adjuvants qui permettent d'entraîner volontairement la formation à l'intérieur des bétons, de petites bulles d'air de taille régulière, réparties de façon stable et homogène grâce aux turbulences générées par les pales du malaxeur et les particules fines et grossières [Friberg, 1976 ; Jin pan, 2011].

Le rôle de ces adjuvants est de stabiliser dans le béton des bulles d'air arrondies dont les diamètres varient de 10 à 1000 μm . Ces bulles sont séparées les unes des autres. La plupart des agents entraineurs d'air modernes ont un caractère anionique. Ceux à caractère cationique sont peu utilisés à cause de leurs couts élevés et de leurs actions modérées [Manai, 1995 ; Du et Folliard, 2005].

Les caractéristiques des bulles d'air et la quantité totale d'air dépendent de plusieurs facteurs :

- La nature de l'agent entraineurs d'air : phénomène d'incompatibilité entre les adjuvant, le ciment utilisé et avec d'autres adjuvants.
- La température du mélange
- Le type, la durée et l'énergie du malaxage
- Les caractéristiques des ajouts cimentaires

2.4 La vibration

a) Avantages et principe de la vibration

Le but de la vibration (consolidation) des bétons est d'améliorer leur qualité et homogénéité en éliminant les nids d'abeilles et la présence des vides en expulsant l'air emprisonné en excès dans le béton frais. En réduisant les vides du béton frais, les particules se rapprochent entre elles. C'est une condition essentielle de résistance mécanique et de durabilité du béton. Mais lors de ces processus des vibrations, on doit éviter de faire sortir des quantités importantes d'air entraînée en surconsolidant le béton et provoquant de la ségrégation. En effet, après sa mise en place et sans avoir vibré, le béton peut contenir une quantité excessive et préjudiciable d'air piégé pouvant varier entre 5% (dans le cas des bétons de grande maniabilité) et 20% (dans le cas des bétons à faible affaissement) [Neville, 2000]. Si jamais le béton est laissé durcir dans cette condition, il sera extrêmement poreux et très perméable et moins durable (Figure 2.6). Donc le béton doit être adéquatement consolidé par une tige métallique ou par vibration afin d'avoir une structure plus compacte et durable [ACI 309 R-05].



Figure 2.6 : Comparaison des qualités de béton [Sotomayor Cruz, 2012]

On peut distinguer deux grandes familles de vibration : la « *vibration interne* » et la « *vibration externe* ».

- **Vibration interne**

La vibration interne ou communément appelée pervibration, car cette technique des vibrations des bétons est employée depuis 1926 avec l'idée de placer le système vibrant à l'intérieur même de la masse du béton frais [P. REBUT, 1962]. La consolidation par vibration interne est la méthode la plus couramment utilisée. Elle est réalisée à l'aide d'une aiguille vibrante placée verticalement dans le béton frais (Figure 2.7).

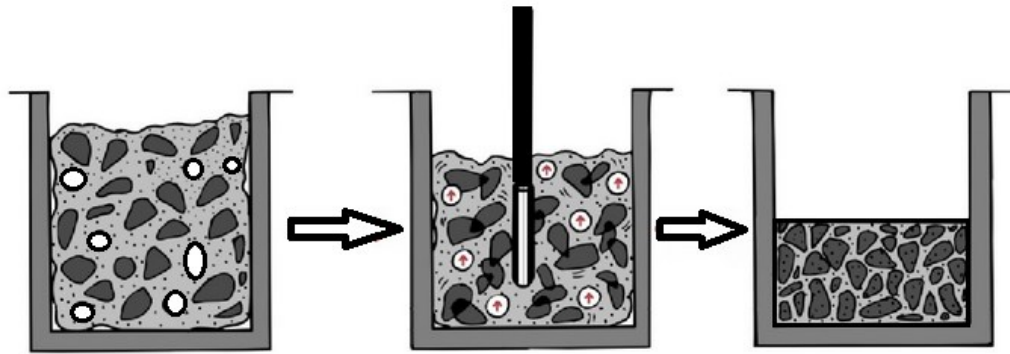


Figure 2.7 : Serrage du béton par vibration interne

Le modèle le plus courant est une aiguille vibrante (Figure 2.8) reliée par une gaine à un moteur électrique. L'aiguille a une masse disposée de façon excentrique par rapport à son axe et quand le moteur électrique fait tourner cette masse, il résulte un mouvement oscillatoire de vibration de l'aiguille vibrante. Les impulsions sont dirigées dans un plan perpendiculaire à l'axe de l'aiguille vibrante [Surprenant, 1956].



Figure 2.8 : Aiguille vibrante à moteur électrique

- **Vibration externe**

Il existe plusieurs types de vibrateurs externes. On peut citer : les vibrateurs de coffrage, mais également les tables vibrantes beaucoup plus utilisées dans l'industrie du béton préfabriqué ainsi que les règles vibrantes, les taloches vibrantes, etc.

2.5 Béton autoplaçant (BAP)

2.5.1 Historique du BAP

Le BAP a été développé dans les années 80 au Japon par les chercheurs de l'Université de Tokyo. Le BAP a été une des plus grandes innovations que le béton ait connues de son histoire. En 1989, Ozawa et Maekawa ont réussi le premier prototype de BAP à l'Université de Tokyo. En 1980, la durabilité des structures en béton était un problème majeur au Japon. La réalisation de structures durables nécessite une consolidation adéquate, réalisée par des ouvriers qualifiés. Mais, le manque d'ouvriers qualifiés dans l'industrie du bâtiment japonaise a poussé d'avantage les chercheurs à trouver une solution pour remédier à ce problème. L'idée était de développer un béton fluide qui ne nécessite pas de consolidation mécanique lors de sa mise en place et qui peut améliorer la qualité et la durabilité des éléments en béton. C'est Okamura en 1986 qui a été le premier chercheur à proposer un béton qui peut se mettre en place par lui-même sous son propre poids [Okamura 1986]. En 1989, Ozawa et Maekawa ont réussi le premier prototype de BAP à l'Université de Tokyo. En 1980, la durabilité des structures en béton était un problème majeur au Japon. La réalisation de structures durables nécessite une consolidation adéquate, réalisée par des ouvriers qualifiés. Mais, le manque d'ouvriers qualifiés dans l'industrie du bâtiment japonaise a poussé d'avantage les chercheurs à trouver une solution pour remédier à ce problème. C'est ainsi que l'utilisation de BAP qui est un béton fluide homogène et qui se met en place par gravitation, sans avoir recours à la vibration, est apparue comme une solution possible à ce problème [Ozawa et Maekawa, 1989].

2.5.2 Atouts des BAP par rapport au béton conventionnel vibré

Par sa facilité de mise en place, le BAP présente plusieurs avantages comparés au béton conventionnel vibré (BCV). Parmi ces avantages, on peut citer :

- L'élimination de la vibration.

- Réduction du personnel ouvrier chargé de la mise en place du béton et la réduction du risque d'accident sur chantier.
- Réduction jusqu'à 10% du coût global de construction grâce à l'utilisation du béton autoplaçant [Szecsy et Coll. 2003].
- Remplissage de géométries complexes, de zones fortement ferraillées et difficilement accessibles.
- Meilleures performances mécaniques, esthétiques et de durabilité.
- Réduction des nuisances sonores associées à la vibration.

2.5.3 Formulation du BAP

La formulation d'un BAP est différente de celle d'un béton conventionnel vibré (BCV). Mais d'une manière générale, les BAP possèdent un même dosage en ciment et en eau que le béton conventionnel. Cependant, le BAP contient moins de gros granulat. L'ajout d'une addition minérale sert de substitut aux gravillons, ce qui résulte en un volume de pâte importante. En effet, le BAP a une teneur en pâte et en granulats fins plus importants, mais un volume en gros granulats plus faible [TURCRY, 2004] (Figure 2.9).

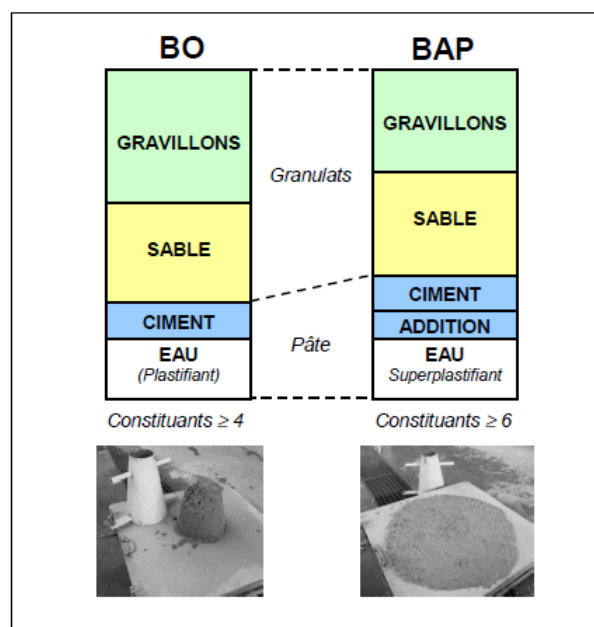


Figure 2.9 : Composition d'un béton ordinaire et d'un BAP [TURCRY, 2004]

Les principes de formulation du BAP sont :

- Limiter le diamètre maximal des gros granulats ainsi que leur volume. La diminution du volume de gros granulats par rapport au volume de pâte permet de diminuer la friction inter-particules entre les granulats [Da Cruz, 2004]. Et améliorer ainsi la déformabilité du béton.
- Diminuer le rapport E/L (Eau/liants) pour avoir une viscosité adéquate qui permettra d'éviter la ségrégation du mélange ou utiliser un agent viscosant [Kashima et coll.,1995].
- Utiliser des superplastifiants pour fluidifier le mélange et diminuer le seuil de cisaillement du mélange sans augmenter le rapport E/L [KHAYAT, 1999].

2.5.4 Caractérisation du BAP

On utilise le cône d'Abrams pour avoir une information sur la fluidité d'un béton. Pour un béton conventionnel vibré, c'est l'affaissement qui est mesuré verticalement [ASTM C143 / C143M]. Par contre, pour un BAP, c'est l'étalement du béton qui est mesuré horizontalement [ASTM C1611 / C1611 M] [HWANG, 2006]. Pour un BAP, l'étalement varie généralement entre 600 à 750 mm [ACI 237]. La mesure de l'étalement permet d'apprécier la déformabilité du béton en milieu non confiné [GEOFFRAY, 2008]. La figure 2.10 représente les différents types de consistance de bétons en termes d'affaissement et d'étalement.

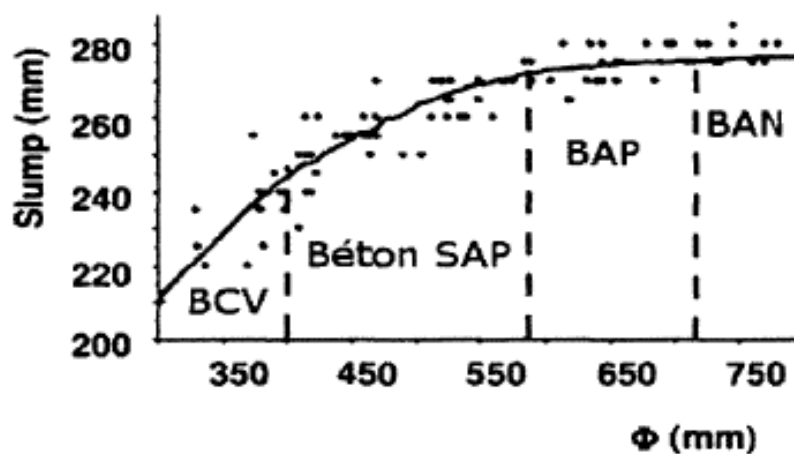


Figure 2.10 : Relation entre l'affaissement et l'étalement des bétons fluides [Khayat,1999]

Par ailleurs, [Zhuguo L, 2007] considère que la mesure de l'étalement est insuffisante pour caractériser la consistance des nouveaux types de béton pour l'adapter à certaines structures et conditions de construction. À cet effet, pour évaluer la déformabilité, plusieurs essais normalisés et non normalisés sont recommandés :

- **Essai d'étalement** : cet essai donne une indication sur la capacité du béton de se déformer sous son poids propre. L'étalement est obtenu lors de mesure de diamètre de la galette suite au soulèvement du cône d'Abrams et à l'arrêt de l'écoulement du béton. L'étalement est relié au seuil de cisaillement, contrainte minimale requise pour initier l'écoulement [ACI 237.R-007].
- **Temps d'écoulement (T_{50})** : on mesure le temps d'écoulement que met le béton au cours de l'essai d'étalement pour obtenir une galette de 500 mm. Ceci nous donne une idée sur la viscosité, qui est l'une des propriétés rhéologiques importantes du béton. Une valeur type varie entre 2 et 7 est demandée pour le BAP [Sotomayor Cruz, 2012].
- **V-funnel** : comme le temps d'écoulement, la boîte en V nous donne également une indication sur la viscosité du béton en mesurant le temps d'écoulement de 12 l du béton à travers un entonnoir de section carrée [Ozawa et coll, 1995]. Si le temps d'écoulement du béton à travers l'entonnoir est élevé, cela signifie que le béton est plus visqueux et moins fluide.
- **L-BOX** : cet essai permet d'évaluer la mobilité du mélange et la ségrégation dynamique d'un BAP. L'échantillon de béton est mis dans la partie verticale en L. Après l'ouverture de la trappe, le béton s'écoule à travers 2 ou 3 armatures de diamètre 14 mm distantes de 39 mm. Après l'écoulement, on mesure la hauteur des parties verticale et horizontale pour ensuite calculer le taux de remplissage h_2/h_1 qui donne une indication sur la capacité de remplissage d'un BAP.

2.6 Rhéologie du béton frais

2.6.1 Définition de la rhéologie

Selon Legrand, la rhéologie décrit les relations entre les contraintes et les déformations d'un élément de volume comptent tenu, le cas échéant, de leurs dérivées par rapport au temps [Legrand, 1982]. Plus précisément, la rhéologie est une branche de la physique qui étudie la déformation ou l'écoulement d'un corps sous l'effet des contraintes appliquées, en prenant en compte la vitesse d'application de ces contraintes et leur variation au cours du temps [Yahia, 2012]. C'est la science des déformations et de l'écoulement de la matière. On dit une matière se déforme si nous lui appliquons une force, elle change alors de forme et de dimension [Huang, 2006] (Figure 2.11).

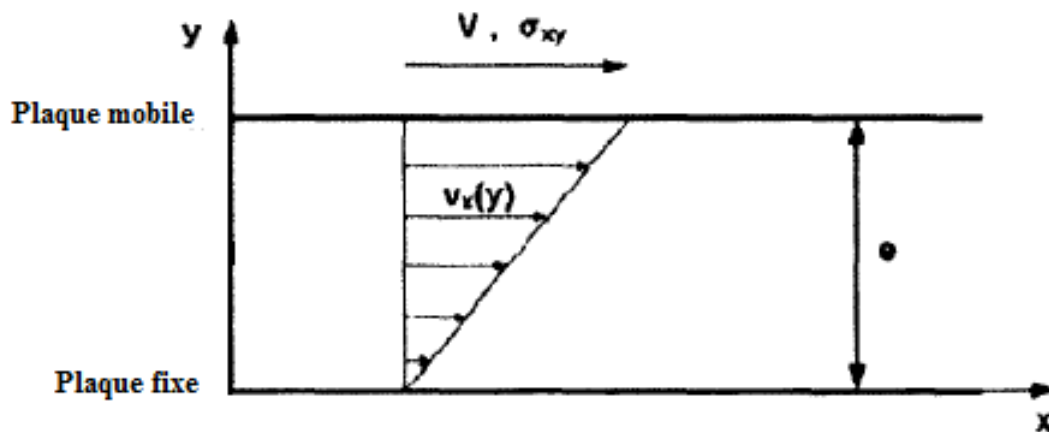


Figure 2.11 : Profil de vitesse pour un écoulement de cisaillement simple d'un liquide newtonien entre deux plans. Le plan supérieur est en mouvement à vitesse V constante [Huang, 2006]

2.6.2 Concepts de base de la rhéologie

Le terme rhéologie a été introduit par le professeur Eugene Bingham en 1920. Comme définit précédemment, c'est une science qui étudie la déformation et l'écoulement des matériaux. L'objet principal de cette science est de définir les paramètres qui conditionnent le comportement rhéologique des matériaux. Il est possible de classer les matériaux en fonction

de leurs comportements rhéologiques en matériau à comportement visqueux, élastique ou viscoélastique [Bingham, 1920].

2.6.3 Paramètres rhéologiques

Deux paramètres rhéologiques principaux permettant la caractérisation d'un béton frais. Il s'agit du seuil de cisaillement (τ_0) et de la viscosité plastique (μ_p).

a) Seuil de cisaillement

Deux types de seuil de cisaillement (τ_0) peuvent être liés au béton, au mortier et à la pâte de ciment :

- **Seuil de cisaillement dynamique (τ_0)** : par définition, τ_0 représente la force de cisaillement nécessaire pour vaincre les forces de liaison intergranulaires entre les grains des différents constituants du béton afin d'entraîner son écoulement. Le seuil de cisaillement dynamique est plus responsable de l'arrêt d'écoulement. Le seuil de cisaillement dynamique est très difficile à mesurer directement, Il correspond à une valeur théorique qui découle de l'extrapolation de la courbe d'écoulement à un gradient de vitesse de cisaillement nul [Bingham, 1920 et Rouis, 2017] (Figure 2.12).

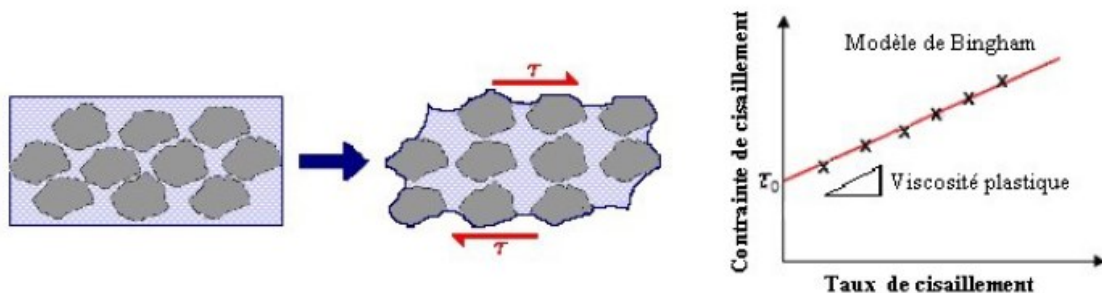


Figure 2.12 : Seuil de cisaillement dynamique (τ_0) [Rouis, 2017]

- **Seuil de cisaillement statique (τ_s)** : τ_s correspond à la contrainte à fournir afin d'avoir le premier signe d'écoulement (Figure 2.13).

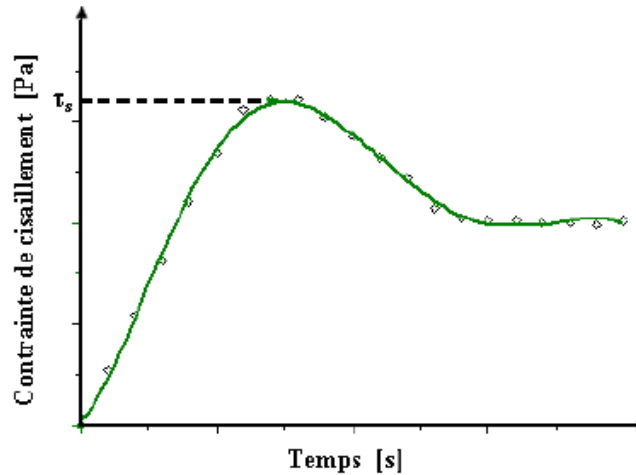


Figure 2.13 : Seuil de cisaillement statique (τ_s) [Wallevik, 2003].

b) La viscosité plastique

La viscosité est définie comme étant la friction interne d'un fluide. Selon Khayat : « la viscosité d'un fluide est la mesure de sa résistance interne (friction) à l'écoulement [Khayat, 2008]. Quand une couche d'un fluide se déplace par rapport à une autre, on doit appliquer une force sur une couche pour la déplacer par rapport à l'autre. Cette force augmente si la friction (viscosité) de ce fluide augmente » [Khayat, 2008].

2.6.4 Comportement Rhéologique

Plusieurs modèles sont proposés afin de décrire les comportements rhéologiques des fluides (Figure 2.14). Le modèle rhéologique le plus simple pour décrire les matériaux visqueux est le modèle newtonien. L'étude de comportement rhéologique est très complexe à réaliser, car le béton contient de particules des tailles différentes suspendues dans l'eau, tels que les particules colloïdales (cendre volante, poudre de verre et fumée de silice) et les particules non colloïdales solides (granulats). Selon Yasmine, chaque taille (échelle) des particules occasionne des interactions différentes entre celles de tailles micrométrique (milieu colloïdal) et centimétriques (milieu non colloïdal) [Yasmine, 2007] (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 : Modèles rhéologiques de suspensions [Ferraris, 1999]

Description du modèle	Équation
Newtonian [Bartos, 1992]	$\tau = \eta \dot{\gamma}$
Bingham [Tattersall, 1976]	$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$
Herschel and Bulkley [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = \tau_0 + K \dot{\gamma}^n$
Power equation [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = A \dot{\gamma}^n$ $n = 1$ Fluide Newtonien $n > 1$ Fluide pseudo plastique $n < 1$ Fluide diluant
Vom Berg [Von Verg, 1979], Ostwald-deWaele [Tattersall, 1976]	$\tau = \tau_0 + B \sinh^{-1} (\dot{\gamma}/C)$
Eyring [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = a \dot{\gamma} + B \sinh^{-1} (\dot{\gamma}/C)$
Robertson-Stiff [Atzeni et coll., 1985]	$\tau = a (\dot{\gamma} + C)^b$
Atzeni et al. [Atzeni et coll., 1983]	$\dot{\gamma} = \alpha \tau^2 + \beta \tau + \delta$
Définition de variables	
τ = Contrainte de cisaillement	η = Viscosité
τ_0 = Seuil de cisaillement	$\dot{\gamma}$ = Vitesse de déformation
$A, a, B, b, C, K, \alpha, \beta, \delta$ = constants	

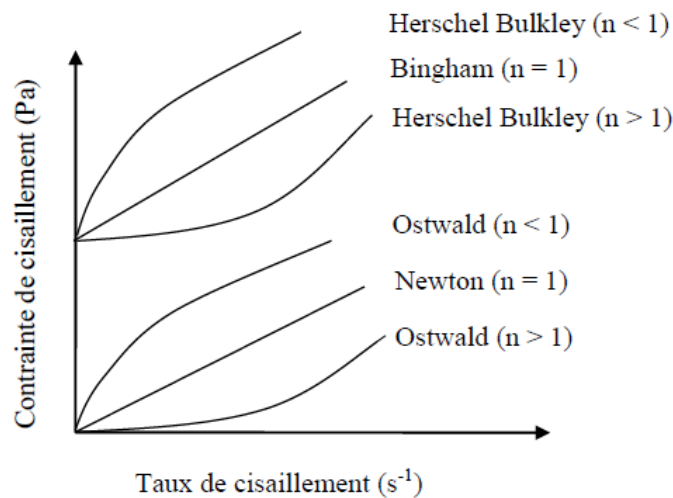


Figure 2.14 : Modèles rhéologiques couramment utilisés en rhéologie [Aïssoun, 2015]

2.6.5 Facteurs affectants la rhéologie du béton

La rhéologie du béton dépend de plusieurs caractéristiques générales à savoir : La teneur en eau, le volume de la pâte, la taille maximale de gros granulats mais également leur forme, la granulométrie du squelette granulaire, le mode de malaxage, temps et énergie, la température, la présence et la quantité des ajouts cimentaire et adjuvants.

Selon powers (1932), la rhéologie du béton est liée à trois facteurs :

- Le module de rigidité : qui représente l'augmentation nécessaire de la contrainte pour produire un déplacement unitaire.
- La force de cohésion qui représente la contrainte de cisaillement du béton frais quand la contrainte normale est nulle. Elle représente la résistance à la ségrégation, au ressuage et à la pompabilité.
- La valeur du déplacement à la rupture par cisaillement.

Il est bien établi que les propriétés rhéologiques du béton frais sont les résultats de l'interaction entre : l'effet de surface des particules fines (y compris l'air) et l'eau, et également l'effet de masse des gros granulats. L'effet de l'eau absorbée par les granulats est aussi important surtout dans le cas des granulats poreux [Bombed, 1967].

2.7 La méthode de mortier de béton équivalent

La méthode du mortier équivalent est une nouvelle méthode d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. Elle consiste à concevoir, à partir d'une composition de béton, un mortier, dit mortier de béton équivalent (MBE), dont les propriétés rhéologiques sont corrélables à celles du béton. La méthode MBE est un outil très utile à la formulation de bétons adjuvantés [A. Schwartzenruber et C. Catherine 1999]. Elle permet, par des suivis rhéologiques, de comparer les performances de différents couples ciment/adjuvant. Le but de cette étude est de diminuer le nombre de gâchées de béton. Le calcul des MBE est basé sur deux réflexions permettant de penser que la surface de constituants importe plutôt que leur volume [Acker, 1988] :

- 1) La première découle du fait que l'ouvrabilité d'un béton provient de la façon dont ses constituants arrivent à glisser les uns sur les autres pour s'écouler.

- 2) La seconde a pour origine la chimie de la prise dans le sens où les hydrates se forment plutôt au niveau des interfaces [Acker, 1988].

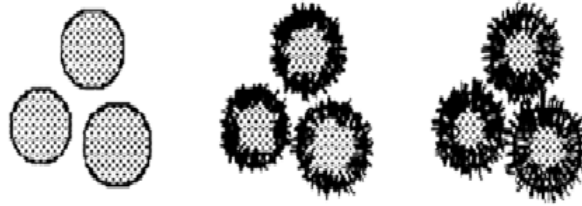


Figure 2.15 : Formation d'hydrates à la surface des granulats [Acker, 1988]

Erdem et coll, montrent que des essais à l'échelle réduite sur des MBE peuvent être utilisés pour évaluer l'effet de la composition du mélange sur les propriétés rhéologiques des bétons autoplacants [Erdem et coll., 2009]. De ce fait, cette étude est menée principalement sur des MBE.

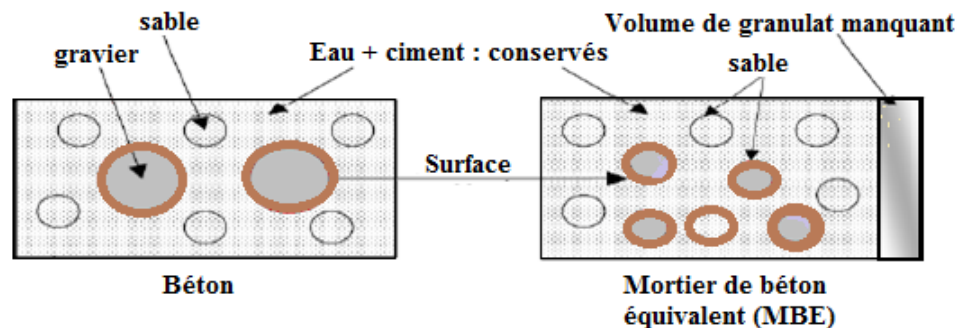


Figure 2.16 : Passage de béton au mortier de béton équivalent (MBE) [Erdem et coll., 2009].

2.8 Indices de Carr

Le manque de connaissance du comportement à l'état frais de BAP a fait apparaître plusieurs problèmes comme le blocage lors de l'écoulement, pressions sur les parois des coffrages, ségrégation, etc. Une étude est alors menée sur la caractérisation des poudres utilisées dans la fabrication des BFRA, notamment les indices d'écoulement (coulabilité, déferlement) des poudres sèches pour comprendre l'effet de leurs caractéristiques sur la rhéologie des BFRA.

Ces indices ont été rarement exploités pour comprendre l'effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA). Lorsque l'on souhaite analyser les comportements d'une poudre sèche, on se confronte à des difficultés résultantes de l'agglomération naturelle des particules fines sous l'effet de forces inter particulaires, qui est dominantes dans le cas des particules de dimension inférieure à 100 μm . Malgré cela, par la nature de la poudre, cette agglomération est plus ou moins forte et peut être appréciée en termes de cohésion ou de coulabilité de la poudre [Diederich, 2010].

Pour observer l'incidence des propriétés physiques des poudres (morphologie, agglomération ; etc.) sur leur comportement à l'écoulement. La morphologie des particules peut influencer la compacité du squelette granulaire, mais aussi l'écoulement des poudres. Cependant, la forme des particules peut être liée aux propriétés rhéologiques. Par exemple certaines particules ont tendance à diminuer les frictions inter granulaires et à faciliter l'écoulement, alors que d'autre non. La forme des particules peut influencer le comportement rhéologique. Cette approche est basée sur une étude empirique réalisée par Carr en 1965 [Carr, 1965]. Carr a mis en place un système de classement empirique de l'écoulement des poudres à travers une série d'essais simples (Figure 2.17). Grâce à ces essais, il est possible de déterminer deux indices, appelés indices de Carr [Carr, 1965] :

- L'indice de coulabilité,
- L'indice de déferlement.

2.8.1 L'indice de coulabilité

L'indice de coulabilité renseigne sur la capacité d'une poudre à s'écouler comme un liquide ; plus la valeur de l'index de coulabilité est importante, meilleur sera l'écoulement naturel de la poudre. L'indice de coulabilité est calculé comme suit :

$$\text{Coulabilité} = \text{Angle de spatule} + \text{Angle de talus} + \text{Compressibilité} + \text{Cohésion}$$

2.8.2 L'indice de déferlement

L'indice de déferlement renseigne sur l'aptitude de la poudre à s'écouler en vague et à former de la poussière (dispersion dans l'air), ce qui rend son contrôle difficile ; plus l'index est élevé,

plus les risques d'écoulements incontrôlables et de formation d'aérosols sont élevés [Diederich, 2010]. L'indice de déferlement est calculé comme suit :

$$\text{Déferlement} = \text{Coulabilité} + \text{Angle de chute} + \text{Angle de différence} + \text{Dispersibilité}$$

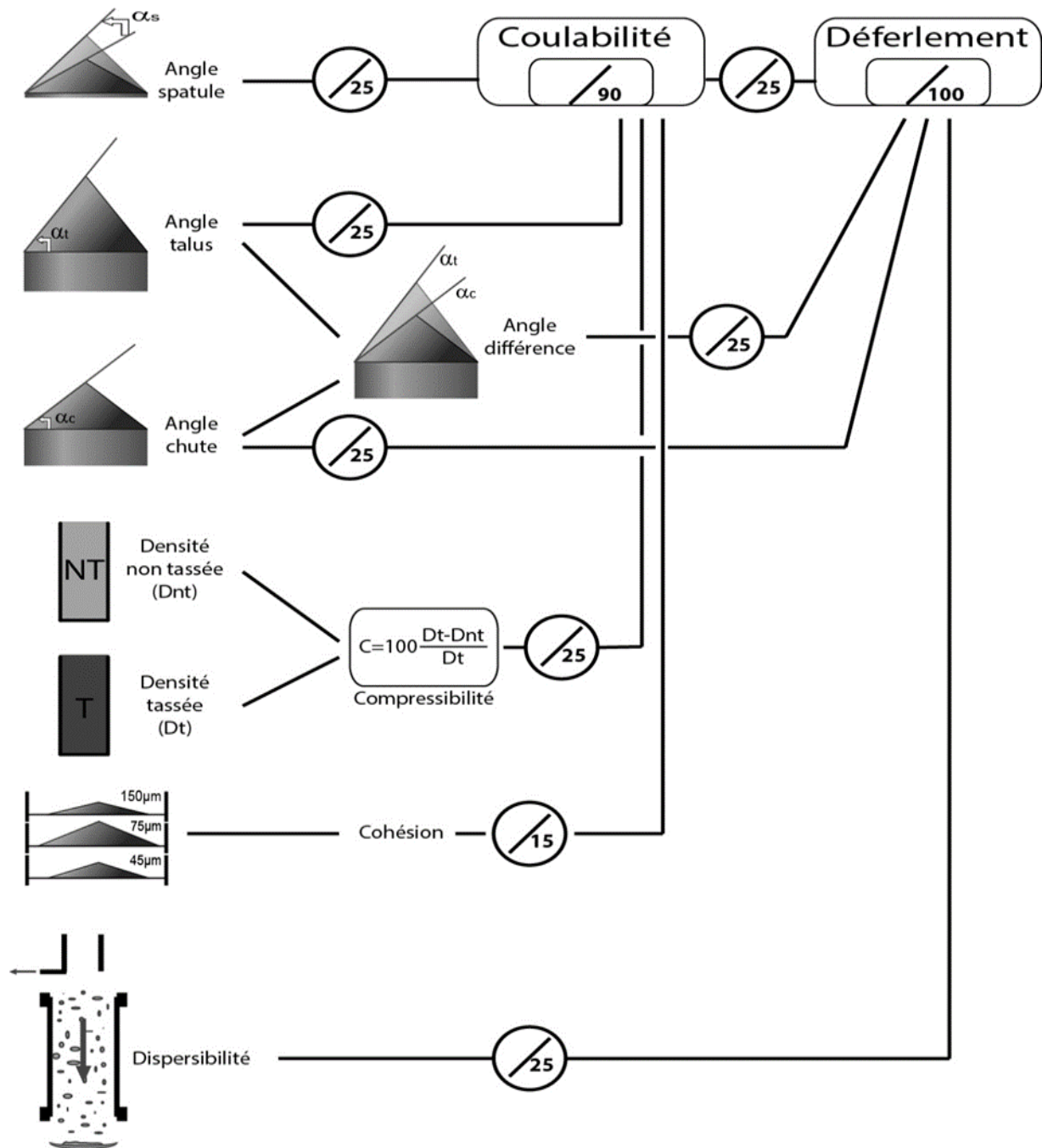


Figure 2.17 : Schéma de calcul des indices de Carr [Carr, 1965]

Chapitre 3 : Programme expérimental et procédures d'essais

3.1 Plan expérimental

Pour atteindre les objectifs visés par cette étude, un programme expérimental élargi comportant trois (3) phases principales a été mis au point. Ces phases sont les suivantes :

Phase 1 : caractérisations des liants cimentaires et liants alternatifs

La caractérisation des poudres est nécessaire afin de comprendre et anticiper leur comportement, que ce soit en vue de l'étude de l'hydratation ou de la rhéologie de la suspension. Cependant, lorsque l'on souhaite analyser les comportements d'une poudre sèche, on se heurte inmanquablement aux difficultés résultantes de l'agglomération naturelle des particules fines sous l'effet de forces inter partielles, telles que celles liées aux charges électrostatiques dominantes dans le cas des particules fines ayant un diamètre inférieur à 100 μm . Dans cette étude, il est important d'étudier la coulabilité des poudres afin de mieux appréhender leur comportement dans les suspensions.

Phase 2 : Optimisation des formulations de BFRA de référence

Cette phase constitue une étape importante dans cette étude, puisqu'il s'agit d'optimiser les formulations de BFRA incorporant différents types de superplastifiants et agents entraîneur d'air. Les BFRA étudiés sont le béton semi-autoplaçant (BSAP) résidentiel et le BSAP pour les infrastructures.

Phase 3 : Effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des BFRA

Des résultats antérieurs ont montré que des essais à l'échelle réduite sur des mortiers de bétons équivalents (MBE) peuvent être utilisés pour évaluer l'effet de la composition du mélange sur les propriétés rhéologiques des bétons auto plaçant [Erdem et coll., 2009]. De ce fait, cette étude est menée principalement sur des MBE. En effet, pour chaque classe de BFRA de référence optimisée (Phase 2), la formulation du MBE correspondante est déterminée et utilisée pour évaluer l'influence des caractéristiques des liants et liants alternatifs (Phase 1) sur

la demande en eau et en adjuvant, la rhéologie et son évolution dans le temps et le développement des résistances à jeune âge. Les MBE étudiés correspondent au BSAP destiné pour les applications résidentielles et au BSAP pour les infrastructures. Le programme expérimental est présenté dans la Figure 3.1.

3.2 Matériaux utilisés

Les liants à considérer dans cette étude ainsi que les taux de remplacement visés sont indiqués dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1: Liants cimentaires et liants alternatifs

Liants et liants alternatifs	Taux de remplacement (%)	Caractéristiques (poudres)
Ciments : GU Ciments composés : Tercem3000 et Terc ³	100	Indices de dispersibilité Coulabilité Déferlement
Liants cimentaires : - Cendres volantes (CV, F) - Fumée de silice (FS)	20 – 30 2 - 8	Cohésion Compressibilité
Liants alternatifs : - Poudre de verre (PV)	15-25	Granulométrie

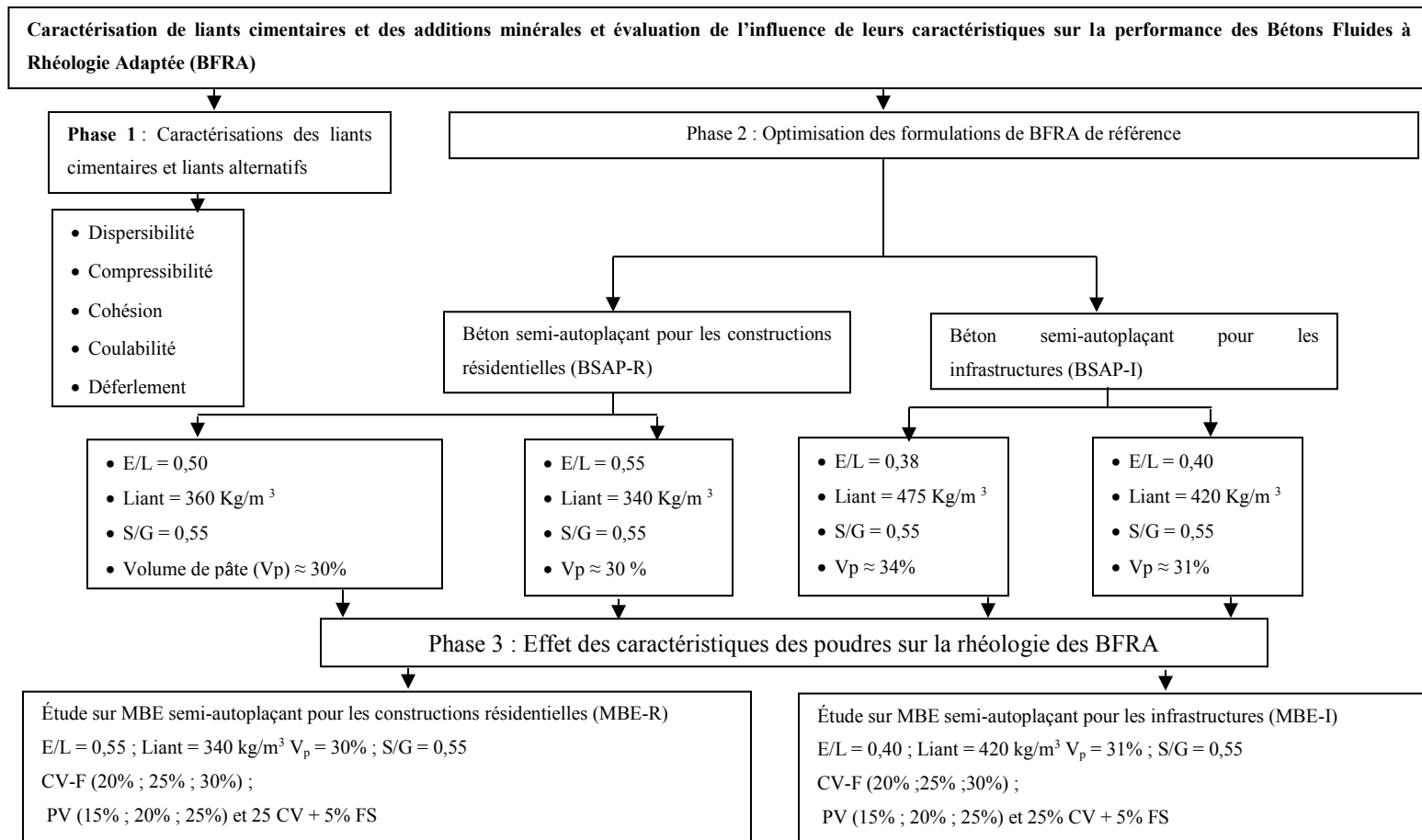


Figure 3.1 : Organigramme du plan expérimental

Pour obtenir la consistance visée pour chaque type de béton et de MBE correspondant, plusieurs adjuvants chimiques sont proposés par nos partenaires industrielles. Des superplastifiants de type polycarboxylate agissant par effet stérique et de naphthalène agissant par effet électrostatique sont utilisés pour la formulation des différentes classes de BFRA. Six différents types de SP de type polycarboxylate (PC) et polynaphtalène (PNS) avec des AEA compatibles sont sélectionnés pour l'étude menée sur les BSAP-R et cinq superplastifiants de type polycarboxylate (PC) et polynaphtalène (PNS) avec des AEA compatibles sont sélectionnés pour l'étude menée sur le BSAP-I.

Parmi les SP sélectionnées pour les BSAP destinés pour les constructions résidentielles quatre sont de type polycarboxylate (A1, A2, B2, B3) avec deux types de AEA (A4, B6) et les deux autres sont de type polynaphtalène (PNS1 et PNS2). Pour les BSAP pour les infrastructures quatre des six superplastifiant sélectionnées sont de type polycarboxylate (A1, A2, B2, C2) et un de type polynaphtalène (PNS2) avec deux types de AEA (A4, B6). Les propriétés physiques des différents adjuvants sélectionnés sont résumées dans le tableau 3.2 et les adjuvants utilisés (Phase 2) pour la formulation des deux classes de BFRA sont dans la Figure 3.2.

Tableau 3.2 : Propriétés physiques des adjuvants chimiques utilisés

Superplastifiant	Densité	Teneur en solides (%)
A1	1,06	40
A2	1,08	40
B1	1,046	20,5
B2	1,09	39
B3	1,038	20
C2	1,09	39,1
PNS1	1,215	40,8
PNS2	1,19	38,7
Agent entraîneur d'air (AEA)		
A4	1,008	10,12
B6	1,011	15,0

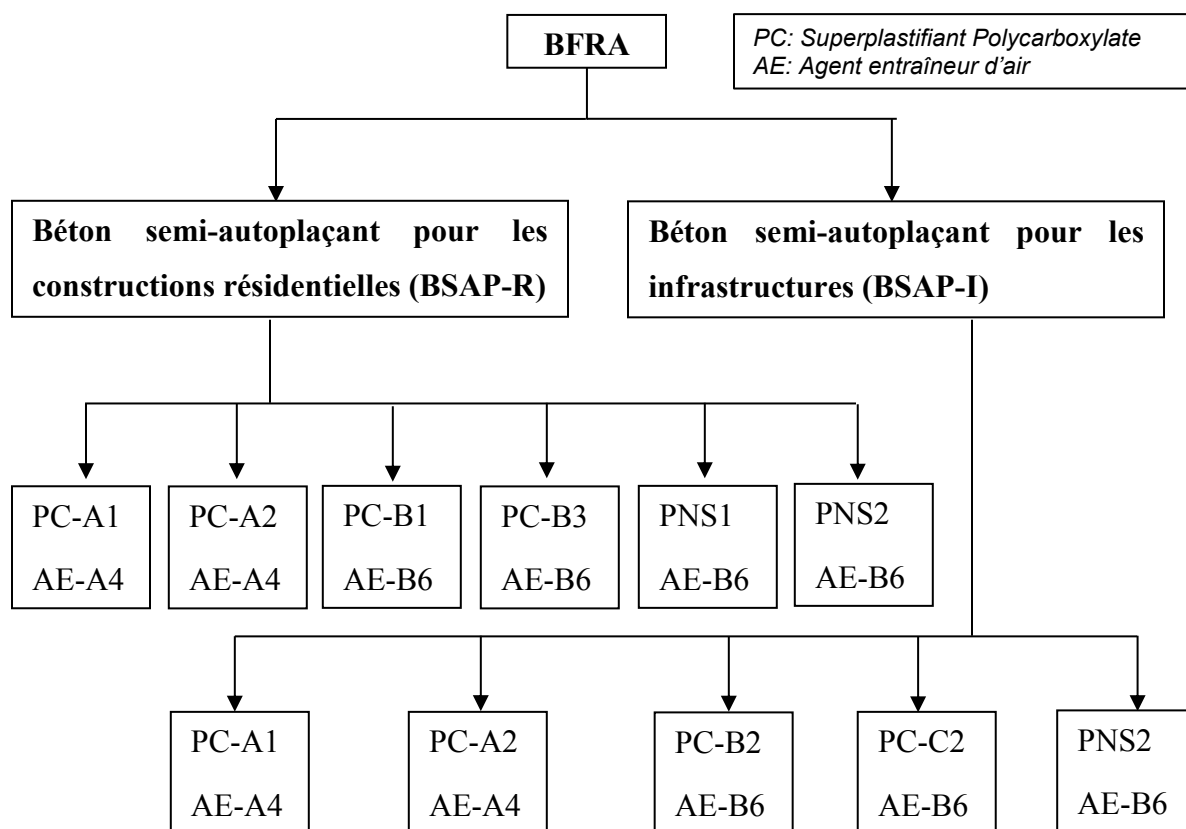


Figure 3.2 : Adjuvants étudiés dans la Phase 2

Les essais expérimentaux de la Phase 3 de ce projet seront réalisés sur les MBE. Les MBE étudiés correspondent au BSAP destiné pour les applications résidentielles et le BSAP pour les infrastructures. Pour chaque classe de BFRA quatre combinaison SP/AE optimums sont identifiées et utilisés pour la formulation du MBE. Parmi les SP sélectionnées pour les MBE-résidentielles (MBE-R) trois sont de type polycarboxylate (A1, A2, B1) et un (1) de type polynaphtalène (PNS2) avec deux types de AEA (A4, B6). Pour les MBE-infrastructures (MBE-I) également trois sont de type polycarboxylate (A2, B2, C2) et un (1) de type polynaphtalène (PNS2) avec deux types de AEA (A4, B6). Les adjuvants sélectionnés pour les études sur le MBE (Phase 3) sont indiqués dans les Figures 3.3.

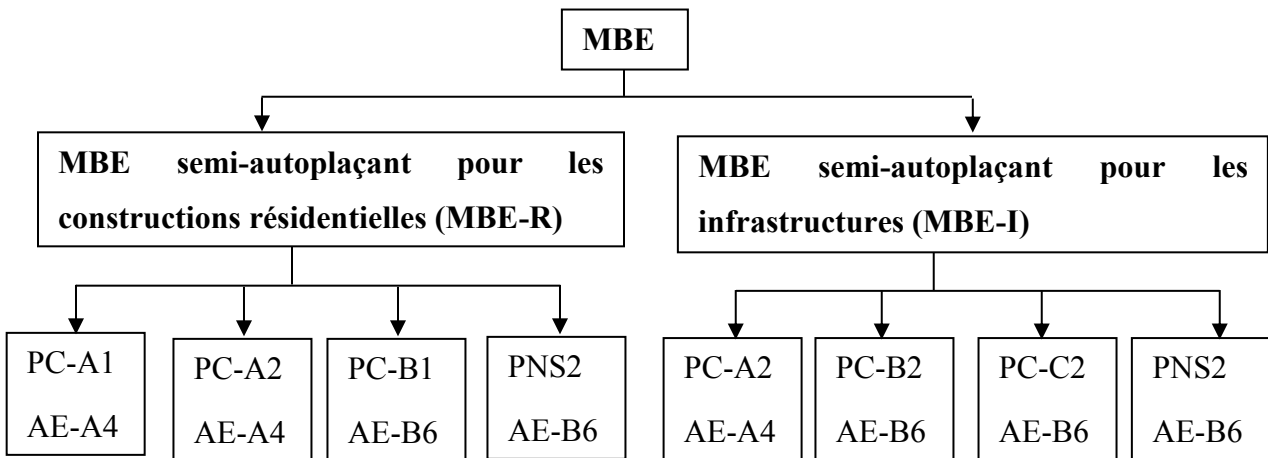


Figure 3.3 : Adjuvants sélectionnés pour réaliser les travaux de la phase 3

3.3 Méthodologie

3.3.1 Procédure de malaxage

Le but du malaxage est d'assurer une bonne homogénéisation entre les constituants et de conférer au béton ou au mortier une bonne performance. Le malaxage des bétons a été fait à l'aide d'un malaxeur Monarch à axe de rotation vertical d'une capacité de 110 L. Le malaxage des MBE a été fait à l'aide d'un malaxeur « Gros Hobart » d'une capacité de 10 L. Afin d'obtenir des résultats comparables, les procédures de malaxage des MBE et de BSAP étaient identiques. La séquence de malaxage suivie pour les MBE et BSAP est la suivante :

1. Introduction du sable et malaxage pendant 30 sec.
2. Correction de l'humidité du sable.
3. Introduction des GG (s'il y a lieu) et malaxage pendant 1 min.
4. Introduction de 50% de l'eau de gâchage avec l'AEA et malaxage pendant 1 min.
5. Introduction du liant et malaxage pendant 30 sec.
6. Introduction de 50% de l'eau de gâchage avec le SP et malaxage pendant 90 sec.
7. Repos de 2 minutes.

8. Reprendre le malaxage pendant 2 minutes.

La température de l'eau de malaxage est ajustée de sorte à limiter la température du béton et du mortier à moins de 22 °C afin de prévenir l'échauffement excessif du mortier. Dans les cas des bétons, les différents essais sont effectués à 10, 15, 30 et 45 min après le premier contact entre l'eau et le ciment. Pour les MBE, les différents essais sont effectués à 10, 40 et 70 min du temps de contact entre l'eau et le ciment. Entre ces intervalles de temps, le mortier est remis dans le malaxeur et chaque 10 min le mortier est remalaxer pendant 1 min afin de prévenir la sédimentation du mortier et simuler les conditions de transport.



(a)



(b)

Figure 3.4 : Malaxeur Monarch (a) pour béton et gros HOBART (b) pour MBE

3.4 Essais de caractérisations

La Figure 3.5 résume les procédures d'essais utilisées dans la caractérisation des poudres, des mortiers (à l'état frais et durci) et des bétons (à l'état frais et durci).

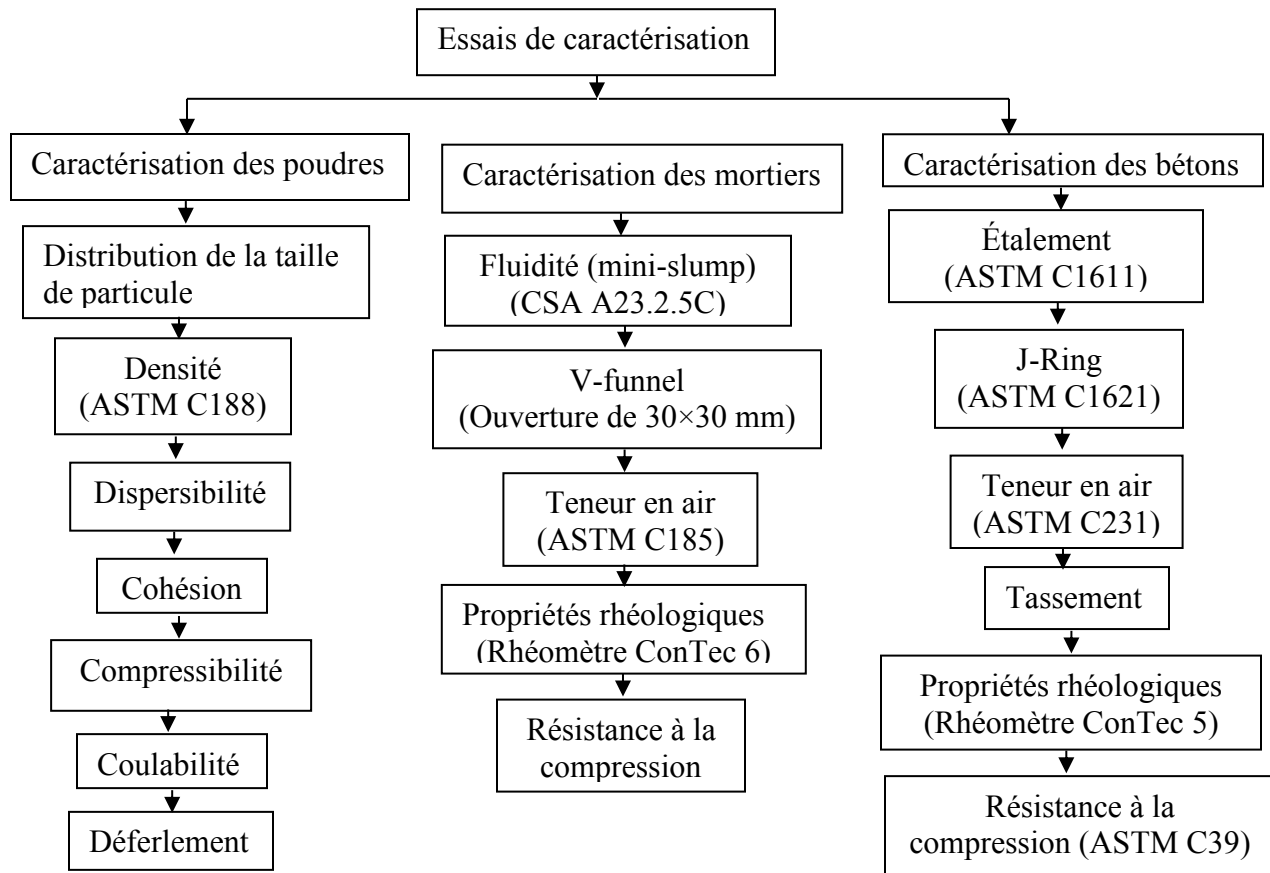


Figure 3.5 : Récapitulatif des essais de caractérisation

3.5 Caractérisation des poudres

Comme indiqué précédemment dans la Phase 1 de cette étude, des essais qui découlent des travaux de Carr [Carr, 1965] (Figure 2.17) sont utilisés pour caractériser les poudres. Les essais conduisant au calcul des indices sont réalisés de manière automatisée par l'appareil Hosokawa (Figure 3.6). Grâce à ces essais, il est possible de déterminer l'indice de coulabilité et l'indice de déferlement de chaque poudre utilisée. En revanche, pour arriver à déterminer ces deux indices, une série de mesure à s'avoir : la densité, la cohésion, la compressibilité, la dispersibilité sont déterminées.



Figure 3.6 : L'appareil Hosokawa

3.5.1 Densité

Les mesures des densités par l'appareil Hosokawa se font en deux temps et permettent de déterminer deux densités : la densité apparente aérée (densité non tassée) et la densité apparente non aérée (densité tassée). On remplit une cellule d'une capacité de 100 ml avec la poudre à analyser. La mise en place de la poudre se fait par gravité et sans apport extérieur d'énergie. La masse alors mesurée permet de calculer la densité non tassée (Dnt). Par la suite, cet échantillon est tassé au moyen de 180 coups réalisés automatiquement par l'appareil. Au cours du tassement, on ajoute de la poudre afin de conserver le volume constant. La nouvelle mesure de masse de poudre permet de déterminer la densité tassée (Dt).

3.5.2 Compressibilité

La compressibilité de la poudre permet d'apprécier le comportement de la poudre dans le temps et sous l'influence d'un apport d'énergie. À partir des mesures de densités apparentes, il est possible de déterminer la compressibilité de la poudre.

La compressibilité est calculée à l'aide de la formule suivante (Eq. (3-1))

$$\%Comp = \frac{Dt - Dnt}{Dt} \quad \text{Eq. (3-1)}$$

3.5.3 Mesures des angles de talus (repos), de chute, de différence et de spatule

Il s'agit de déterminer trois types d'angle de tas, faisant intervenir ou non une énergie extérieure qui aura pour effet de diminuer les interactions et donc de voir le comportement de la poudre en mode dynamique. En fonction de sa cohésion, une poudre va former, lors de son dépôt, des tas ayant des angles plus ou moins importants. Un angle important résulte de fortes interactions entre les particules au sein de l'échantillon (les frottements inter-granulaires). Les trois angles peuvent être déterminés de la manière suivante :

- Le premier angle, le plus simple, mais également le plus difficile à obtenir, est l'angle de talus. Il s'agit de l'angle naturel du tas de poudre formé par la poudre tombant sur un support. Pour observer l'évolution sous l'influence d'un apport d'énergie extérieure, ce tas de poudre va subir une série de chocs par l'intermédiaire du support. Plus l'angle résultant est important, plus la poudre est cohésive et aura une résistance accrue aux manipulations.
- L'angle différence (angle initial - angle final) va renseigner sur les risques d'écoulements par vagues qui peuvent engendrer des difficultés lors de la manipulation de la poudre.
- La troisième mesure d'angle est réalisée en extrayant verticalement un échantillon de poudre auquel on va également appliquer une énergie de vibration). Plus la différence d'angle (avant et après vibration) est grande plus la poudre peut être considérée comme cohésive.

3.5.4 Cohésion

Deux autres essais viennent s'ajouter aux mesures de compressibilité et des angles afin de calculer les indices de Carr.

La mesure de la cohésion va renseigner sur la capacité des particules à se dé agglomérer par voie sèche en réalisant une mesure par tamisage à travers trois tamis définis par Carr. Une relation empirique reliant les passants aux trois tamis va permettre de qualifier la Poudre. La cohésion est calculée comme suit (Eq. 3-2) :

$$\%Cohe = \frac{10*(5*m_{150} + 3*m_{75} + m_{45})}{(m_{150} + m_{75} + m_{45})} \quad \text{Eq. (3-2)}$$

La cohésion est une relation empirique entre les masses recueillies sur les tamis 150, 75 et 45 µm (c.à.d. m_{150} , m_{75} et m_{45}). Plus la cohésion de la poudre est importante, moins bon sera son écoulement.

3.5.5 Dispersibilité

La dispersibilité caractérise le comportement de la poudre lors de la chute dans l'air et donc sa propension à se disperser naturellement dans l'air. Elle évalue la dispersibilité dans l'air de la poudre en faisant chuter 10 g de poudre d'une hauteur définie. On récupère ensuite une partie de l'échantillon de poudre qui tombe dans un verre de montre calibre. On calcule alors un indice de dispersibilité comme suit (Eq. 3-3) :

$$\%Disper = \frac{m_{initiale} + m_{recueillie}}{m_{initiale}} \quad \text{Eq. (3-3)}$$

3.5.6 Caractérisation des bétons

Étalement et le temps d'écoulement (t40)

L'étalement est mesuré à l'aide du cône d'Abrams. Cet essai donne une indication sur la capacité du béton de se déformer sous l'effet de son poids propre (Figure 3.7). Pour un BAP, cet essai est réalisé selon la méthode de la norme ASTM C1611, alors que pour le BCV cette mesure est réalisée selon la norme ASTM C143. Dans le cas d'un BCV, un pilonnage de 25 coups/couche est appliqué, alors que pour les BSAP, un pilonnage de 10 coups est appliqué avant de soulever le cône [Leclerc, 2011]. Le temps nécessaire pour que le béton atteigne un diamètre de 500 mm pour les BAP t50 (50 = indice) et un diamètre de 400 mm pour les BSAP t40 (40 = indice) est mesuré. Quand le béton s'arrête de s'écouler, la moyenne des deux diamètres perpendiculaires de la galette est mesurée.

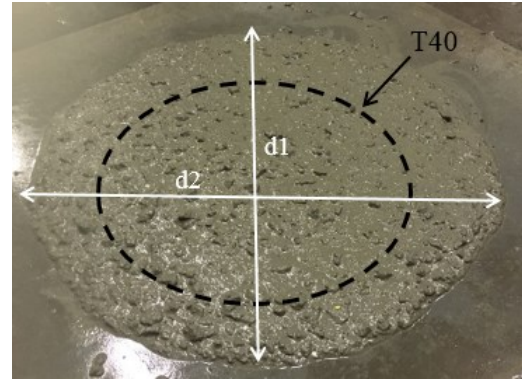
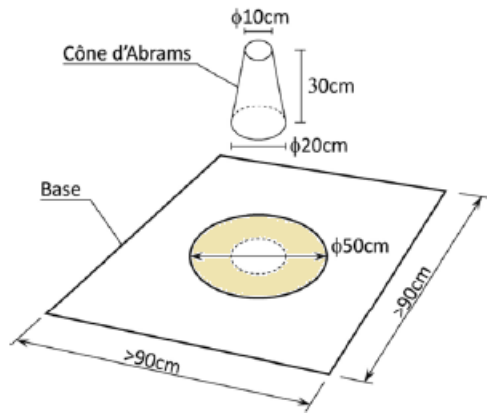


Figure 3.7 : Essai d'étalement pour BSAP

L'entonnoir en V (V-funnel)

L'essai d'écoulement au V-funnel (Figure 3.8) mesure le temps d'écoulement d'un échantillon de béton à travers un entonnoir. Cet essai évalue la capacité de passage du béton à travers les endroits confinés. L'entonnoir est rempli de 10 L de béton. Le temps que met le béton pour s'écouler entièrement de l'entonnoir est déterminé. Un béton semi-fluide et homogène va avoir un temps d'écoulement court ou moyen. Alors que s'il est semi-fluide et non stable, le temps d'écoulement sera très lent à cause du blocage des granulats au fond de l'entonnoir.

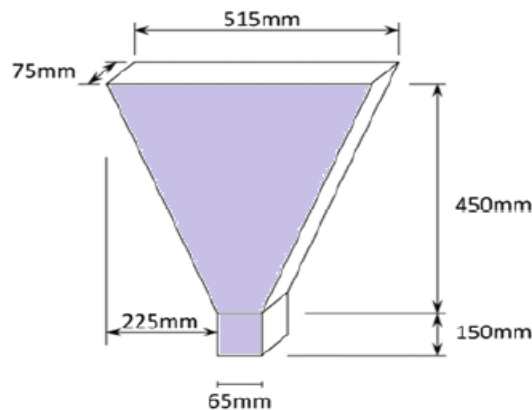


Figure 3.8 : L'entonnoir en V (V-funnel)

L'essai d'étalement à l'anneau (J-ring)

L'essai d'étalement à l'anneau (J-Ring) est également mesuré à l'aide du cône d'Abrams et d'un anneau rigide selon la norme ASTM C1621. C'est un essai au cours duquel le béton est perturbé par une série d'armatures placées autour du cône (Figure 3.9). Le cône d'Abrams est utilisé avec l'anneau en acier dont le diamètre est de 300 mm, auquel sont attachées 16 barres

d'acier de 16 mm de diamètre et de 200 mm de hauteur, pour engendrer des restrictions. L'espacement entre deux barres est de 43 mm. L'étalement du béton ainsi que la hauteur du béton au centre et juste après les barres d'acier sont mesurés. La capacité de passage est obtenue de la différence d'étalement avec et sans la restriction imposée par le J-ring. Le tableau 3.3 donne une indication sur la capacité du blocage du béton à travers le J-Ring.

Tableau 3.3 : Estimation du blocage à travers J-Ring selon la norme ASTM C1621

Différence entre l'étalement et l'étalement à travers J-Ring	Estimation du blocage
0 à 25 mm	Pas de blocage visible
> 25 mm	Blocage minimal à notable
> 50 mm	Blocage important



Figure 3.9 : J-Ring avec 8 barres pour le BSAP

Boîte en L (L-Box)

Comme pour l'étalement à l'anneau, l'essai de la boîte en L (Figure 3.10) est aussi utilisé pour évaluer l'écoulement restreint et la résistance au blocage des BSAP. À cause de la consistance semi-fluide du BSAP, le nombre de barres est modifié à 2 barres de diamètre 12 mm (donnant un espacement libre de 59 mm) au lieu de 3 barres préconisées pour le BAP. L'essai consiste à couler un échantillon de béton dans la partie verticale de la boîte. On ouvre la trappe et on observe l'écoulement à travers les deux barres d'armatures séparant la partie verticale et la partie horizontale de la boîte. Le temps que le béton mette pour atteindre la distance de 400 mm dans la partie horizontale est mesuré. Quand le béton est stabilisé, on mesure la hauteur du

béton à la partie horizontale H2 et la partie verticale H1. Ces deux mesures permettent de calculer la capacité de passage qui est $H2/H1$. Le béton semi-autoplaçant nécessite un minimum de vibration pour atteindre la capacité de passage souhaitée. Les travaux de Leclerc [Leclerc, 2011] effectués, entre autres, sur les protocoles d'essais des bétons semi-autoplaçants, il est préconisé d'appliquer une vibration par le biais d'une aiguille vibrante dans la partie verticale du L-Box. Les vibrations sont appliquées par palier de 5 secondes, jusqu'à l'obtention d'un taux de remplissage de 80%. Le tableau 3.4 résume la capacité de remplissage du BSAP selon le temps de vibrations appliqué [Leclerc, 2011].

Tableau 3.4 : Capacité de remplissage des BSAP en fonction du temps de vibration pour un taux de remplissage de 80%

Temps de vibrations (sec)	Estimation de la capacité de passage
0 à 5	Excellente
5 à 10	Admissible
Supérieur à 10	Remplissage insuffisant ou blocage de granulats

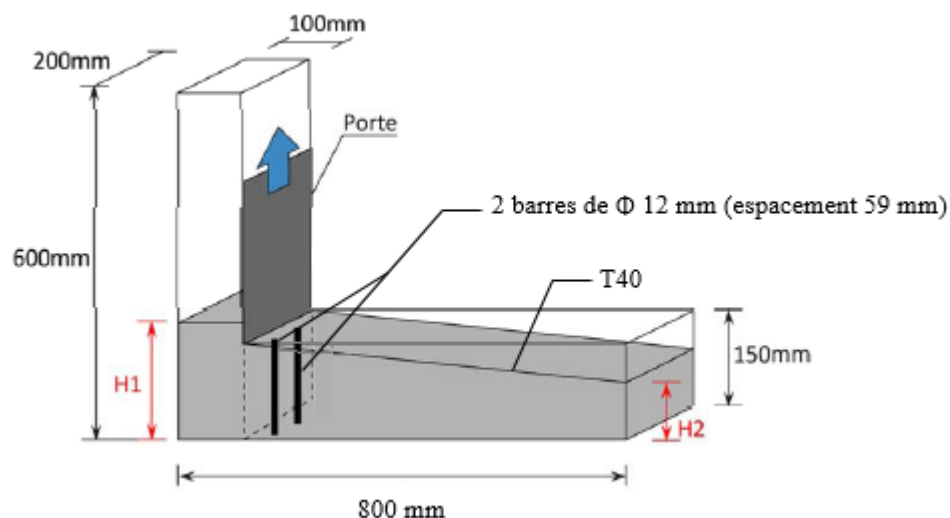


Figure 3.10 : L-Box à 2 barres pour BSAP

Teneur en air

La teneur en air du béton frais est déterminée selon la norme ASTM C 231. Le principe de l'essai est de remplir un volume déterminé de béton, le mettre sous une pression dans un récipient hermétiquement fermé, pour comprimer l'air contenu dans le béton. La teneur en air est mesurée moyennant le manomètre.

Tassement

L'essai de tassement (Figure 3.11) est réalisé sur des colonnes de béton dont la hauteur est de 700 mm. Le principe est de remplir la colonne avec du béton jusqu'à 650 mm de hauteur, une plaque en plexiglas de 200 mm de diamètre et de 4 mm d'épaisseur est placée sur la surface du béton frais à l'aide de 3 boulons de 35 mm de hauteur chacun, pour suivre le tassement du béton. En suite en contact de la plaque en plexiglas, une aiguille ($l = 24$ mm) d'un comparateur de détecteur de déplacement ayant une précision de $0,2 \mu\text{m}$. On note la variation du tassement au cours du temps jusqu'à la prise du béton (stabilisation du mouvement). Dans notre cas, pour les BSAP résidentiel et d'infrastructure optimisés la stabilisations ont apparu au bout de 24h. Ceci est probablement dû au caractères semi-autoplaçant et aux différents adjuvant utilisé. Ainsi on détermine le tassement total relatif ($dt_{\text{ass}} (\%)$) par division de la valeur maximale du tassement (dh) sur la hauteur de la colonne.



Figure 3.11 : Colonnes de tassement de BSAP

Rhéomètre ConTec 5

Le rhéomètre ConTec 5 est destiné pour les bétons (Figure 3.12) dont le diamètre maximal des particules est inférieur à 22 mm, [ConTec, 2006]. Le ConTec 5, comme le Contec 6 pour mortier, est un rhéomètre à cylindres coaxiaux qui mesure la variation du couple résistant sous des vitesses angulaires variables. Les deux cylindres (intérieur et extérieur) comportent des nervures afin de prévenir le glissement du béton entre les parois des cylindres. Il est utilisé pour la mesure des propriétés rhéologiques des bétons, à savoir le seuil de cisaillement et la viscosité plastique. Le protocole de mesure est contrôlé par le logiciel FreshWin dont les paramètres peuvent être ajustés selon les besoins (tableau 3.5). Les paramètres de mesures utilisés pour les BSAP sont présentés dans le tableau (3.5).

Tableau 3.5 : Protocole de mesure suivi pour les BSAP

Type de béton	Vitesse rotation minimale (tour/sec)	Vitesse de rotation maximale (tour/sec)	Nombre de paliers	Temps de mesure/palier (sec)	Nombre de points
BSAP	0,025	0,4	8	4	50

Contec 5



Cuve de contec 5



Résultats du rhéomètre

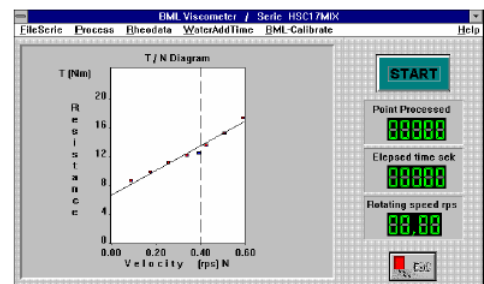


Figure 3.12 : Rhéomètre ConTec 5 pour bétons

Perméabilité aux ions de chlorure

L'essai est réalisé selon la norme ASTM C1202. Cet essai donne une indication rapide de la résistance du béton à la pénétration des ions chlorures. L'essai consiste à placer deux échantillons de 50 mm d'épaisseur et de 95 mm de diamètre entre deux chambres contenant deux solutions. La première contient de chlorure de sodium (3 % de NaCl) dans laquelle se trouve une cathode et la deuxième solution contient de soude (0,3N de NaOH) où se trouve une anode. Les échantillons sont maintenus sous une différence de potentiel de $60 \pm 0,1$ V pendant 6 heures. La charge électrique qui passe à travers l'échantillon est enregistrée chaque 30 min. Une échelle est donnée dans la norme ASTM C1202. Le tableau 3.6 donne une estimation sur la perméabilité des bétons aux ions chlorure en fonction de la charge électrique mesurée.

Tableau 3.6 : Niveau de pénétrabilité aux ions chlore tirées de la norme ASTM C1202

Charge (Coulombs)	Perméabilité aux ions de chlorure
> 4000	Élevée
2000 – 4000	Modérée
1000 – 2000	Faible
100 – 1000	Très faible
< 100	Négligeable

Résistance à la compression

La résistance à la compression est mesurée, par compression axiale sur des cylindres de 100×200 mm, conformément à la norme ASTM C39. Les mesures sont effectuées à l'âge de 1, 3, 7, 28, 56 jours. La moyenne de trois cylindres est prise pour chaque béton. Après un durcissement dans la chambre humide, les surfaces des cylindres sont mises à niveau par surfacage. Une machine de compression ayant une capacité maximale de 1112 kN (250 000 lbf) avec une application d'un taux de chargement de 0,28 MPa/sec (500 lb/sec) est utilisée. Après le surfacage des cylindres, ils sont soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture. Le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette donne la résistance à la compression.

3.5.7 Caractérisation des MBE

Les MBE sont caractérisés selon les normes en vigueur (Figure 3.4). La fluidité et la capacité de passage des mélanges sont déterminées par le mini-cône, l'entonnoir en V et le rhéomètre ConTec 6. La teneur en air des MBE est déterminée selon la norme ASTM C185. La caractérisation des MBE se termine par la détermination des résistances à la compression à jeune âge. Une description détaillée des essais de caractérisation est présentée ci-dessous.

Essai du mini-cône

L'essai consiste à verser le mortier dans le mini-cône qui est placé au préalable sur une plaque de plexiglass bien à niveau puis soulever d'un coup le cône. Lorsque le mortier sera bien étalé, la valeur de l'étalement correspond au diamètre moyen de la galette du mortier. Le diamètre de l'étalement définit la fluidité des MBE. L'essai du mini-cône pour mortier est un essai qui s'apparente à celui de l'étalement du béton. Les dimensions du mini-cône sont illustrées sur la Figure 3.13.

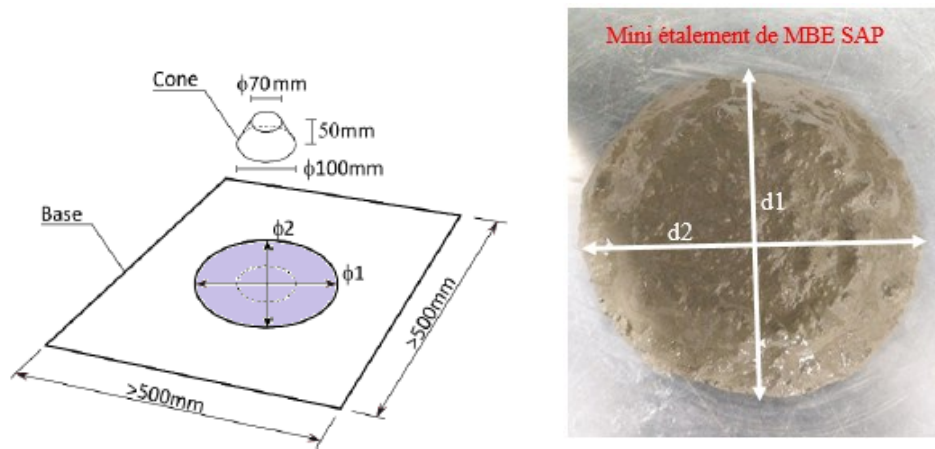


Figure 3.13 : Essai du mini-cône pour MBE

Le mini entonnoir en V (mini V-funnel)

L'essai de mini-entonnoir en V est un essai qui consiste à mesurer le temps d'écoulement du mortier à travers un entonnoir en V entre l'instant de l'ouverture de l'orifice de l'entonnoir et l'instant de l'apparition de la première lumière en regardant verticalement vers le bas de l'entonnoir. Les dimensions de l'entonnoir sont indiquées sur la Figure 3.14.

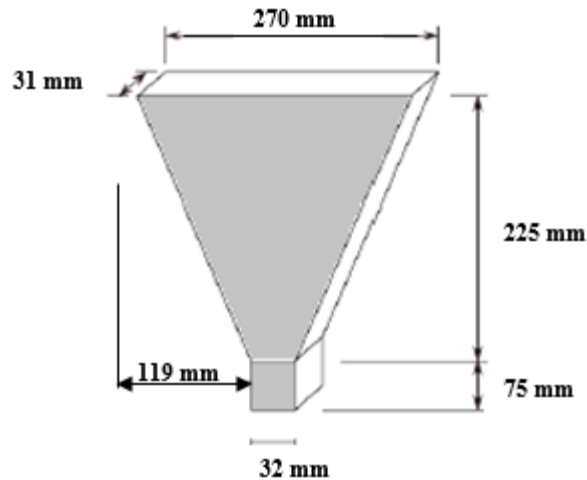


Figure 3.14 : Mini entonnoir en V (V-funnel) pour MBE

Teneur en air

La teneur en air des mortiers a été mesurée à l'aide d'un mini air mètre (Figure 3.15) conçu pour les mortiers.



Figure 3.15 : Mini air-mètre pour mortier

Rhéomètre ConTec 6

Le rhéomètre ConTec 6 (Figure 3.16) est un rhéomètre à cylindres coaxiaux qui permet de mesurer le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des mortiers dont le diamètre maximal des particules est inférieur à 5 mm [ConTec BML, 2006]. L'appareil possède un cylindre

intérieur fixe connecter à une cellule qui mesure le couple et un cylindre extérieur rotatif. Le logiciel FreshWin permet de faire fonctionner et contrôler le rhéomètre. Le protocole de mesure et la géométrie du cylindre sont introduits à partir du logiciel. Les mesures sont effectuées sur une courbe de paliers descendants des gradients de vitesse. Les paramètres du protocole suivi sont présentés dans le Tableau 3.7.

Tableau 3.7: Protocole de mesure suivi pour les MBE-SAP

Type de MBE	Vitesse rotation minimale (tour/sec)	Vitesse de rotation maximale (tour/sec)	Nombre de paliers	Temps de mesure/palier (sec)	Nombre de points
MBE-SAP	0,025	0,5	10	5	50



Figure 3.16 : Rhéomètre ConTec 6 à cylindres coaxiales pour mortiers

Résistance à la compression

La résistance à la compression à jeune âge des MBE est déterminée selon la norme ASTM C109 sur les cubes de 50 mm. La moyenne de trois cubes est prise pour chaque âge.

Chapitre 4: Caractérisation des ciments, ajouts cimentaires et liant alternatifs

4.1 Introduction

Il s'agit dans ce chapitre de faire une caractérisation approfondie des ciments, ajouts cimentaires et liants alternatifs au-delà de la caractérisation sommaire habituelle (finesse Blaine et distribution granulométrique). Il s'agit effectuer des mesures de la morphologie, mais aussi des indices d'écoulement (coulabilité et déferlement) pour évaluer la compressibilité, l'agglomération, la dispersibilité et la cohésion des poudres. Ces caractérisations sont essentielles pour pouvoir optimiser des combinaisons liant-adjuvants compatibles et performant pour différentes classes de BFRA. Cette approche est basée sur une étude empirique réalisée par Carr pour définir la coulabilité et le déferlement (indices de Carr, Figure 2.17) calculés à partir de la compressibilité, l'agglomération et la cohésion de la poudre.

4.2 Optimisation du protocole d'essais

Après avoir effectué plusieurs essais de caractérisation sur les différentes poudres, les protocoles d'essais optimisés à travers une série d'essais répétitifs sont présentés dans le tableau 4.1. Ces protocoles ont été optimisés en utilisant différents types de poudres couvrant un large étendu de finisse, distribution granulométrique, densité, etc.

Tableau 4.1 : Protocoles d'essais optimisés

Poudres étudiées	Protocole d'essais optimisé	
Ciment GU Fumée de Silice Laitier Cendre Volante/C Cendre Volante/F Poudre de Verre Filler Calcaire HP-SA Filler Calcaire 10-SA Filler Calcaire 17-SA Tercem3000 Terc3	Angle de talus	Amplitude : 0,5
		Temps d'opération : indéterminé
	Angle de chute	Nombre de tape : 3
	Angle de différence	Aucun paramètre
	Angle de spatule	Amplitude : 1
		Nombre de tape : 1
	Compressibilité	Amplitude : 1,5
		Temps d'opération : 30
	Cohésion	Amplitude : 1
		Temps d'opération : 120
		Quantité de poudre : 2 g
Métakaolin	Dispersibilité	Quantité de poudre : 6 g
	Tamis	710 μm
	Compressibilité	Temps d'opération : 60
Fillers calcaire F-SA	Tamis	1,70 mm
	Angle de Talus	Amplitude : 1
	Compressibilité	Temps d'opération : 150

Il est important de rappeler que tous les poudres ne peuvent pas être caractériser de la même manière à cause des fortes liaisons inter particulaires de certaines poudres mais aussi une agglomération plus fortes rend difficile l'écoulement de la poudre donc il est quasi impossible d'avoir une bonne coulabilité si le protocole d'essai n'est pas bien défini, de ce fait parmi les poudres caractériser les protocoles d'essais de métatakaolin et de Fillers calcaire F-SA diffèrent des protocoles des autres poudres caractériser.

4.3 Caractérisation qualitative des ciments, ajouts cimentaires et liant alternatifs

Dans cette partie, nous allons observer l'incidence des propriétés physiques des poudres (ciments, ajouts cimentaires et liants alternatifs) sur leur comportement à l'écoulement. Comme indiqué précédemment, nous allons utiliser des essais qui découlent directement des travaux de Carr [Carr, 1965] pour évaluer la compressibilité et la capacité à l'écoulement des poudres à l'état sec. Ce dernier a mis en place un système de classement empirique de l'écoulement des poudres à travers une série d'essais simples. Grâce à ces essais, il est possible

de déterminer deux indices appelés indices de Carr. Les essais conduisant au calcul des indices sont réalisés de manière automatisée grâce à l'appareil Hosokawa (Figure 3.6). Il est à noter que toutes ces analyses sont réalisées sous des conditions de température et d'humidité relative similaires (20° à 25°C).

4.4 Caractérisation des matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude sont présentés dans le tableau 4.2. Les adjuvants chimiques sont choisis en collaboration avec les partenaires industriels. Les différents ajouts cimentaires et les liants alternatifs, leurs désignations ainsi que leurs propriétés physiques sont présentées dans le tableau 4.2. Ces matériaux sont des produits commerciaux couramment utilisés dans le marché canadien du béton. Deux types de ciment ont été utilisés, dans cette étude. Dans la phase 2, un ciment ternaire de type GUb F/SF produit par CRH canada a été utilisés, alors que dans la phase 3, un ciment portland de type GU a été utilisé. La composition chimique du ciment, est donnée dans le tableau 4.3, alors que la distribution de la taille des particules des différents ajouts cimentaires et liants alternatifs est présentée sur la figure 4.1.

Tableau 4.2 : Identification et propriétés physiques des différents ajouts cimentaires et liants alternatifs

Nature	Type	Désignation	Densité (g/cm ³)	Surf. Blaine (m ² /kg)	Surf. BET (m ² /g)
Ciment	GU	Ciment	3,15	444	1557
Poudre de verre	-	PV	2,52	593	1234
Cendre volante	Classe F	CV-F	2,51	383	1101
Fumée de silice	-	FS	2,20	-	18950
Ciment ternaire	GU _b F/SF	Terc ³	2,96	531	2235

Tableau 4.3 : Composition chimique des ciments

Composition chimique (%)	Type de Ciment	
	GU	GUb F/SF
Al ₂ O ₃	4,3	9,0
SiO ₂	20,8	33,4
Fe ₂ O ₃	2,4	4,5
CaO	62,5	44,3
MgO	2,2	1,0
SO ₃	3,5	3,0
Na ₂ O éq.	0,90	0,85

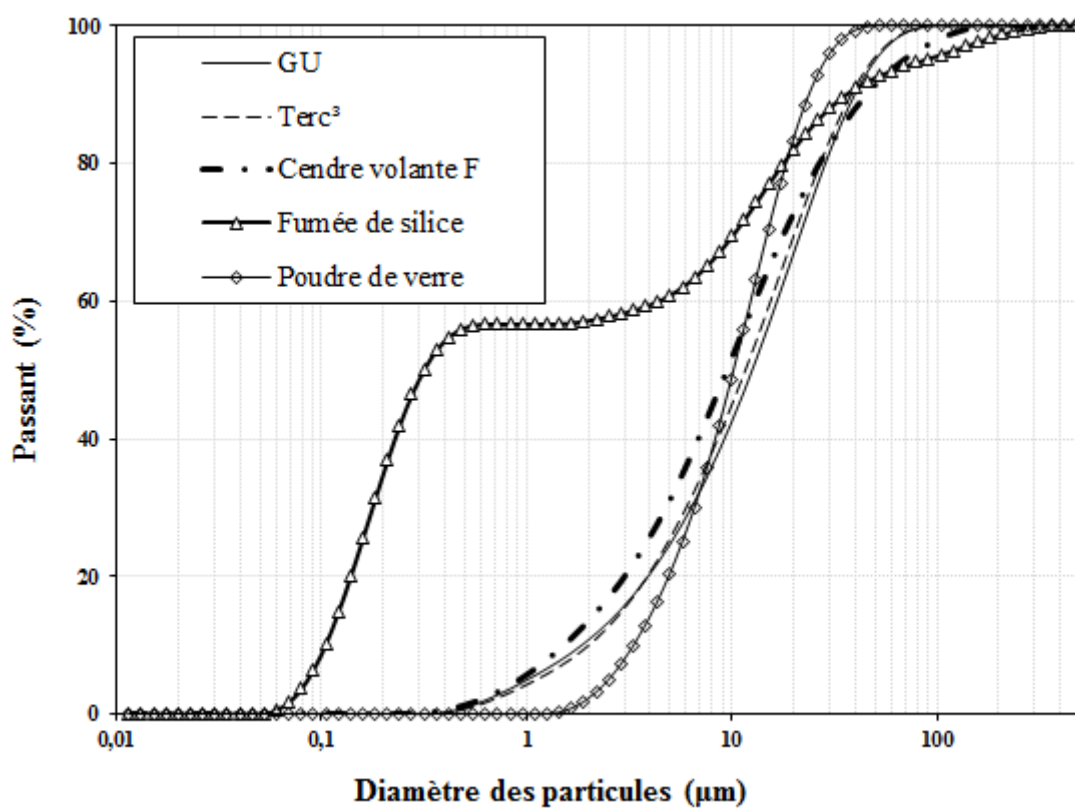


Figure 4.1 : Granulométrie des ciments et des ajouts Cimentaires utilisés

4.4.1 Ciment

Les bétons étudiés dans la Phase 2 sont formulés à partir du ciment ternaire GUb F/SF (Terc³) et les MBE sont produites à partir du ciment Portland type GU dont les propriétés physico-chimiques sont résumées dans les tableaux 4.2 et 4.3. La Figure 4.2 montre les Photos des grains des deux ciments Terc³ (a) et GU (b) prises par MEB.

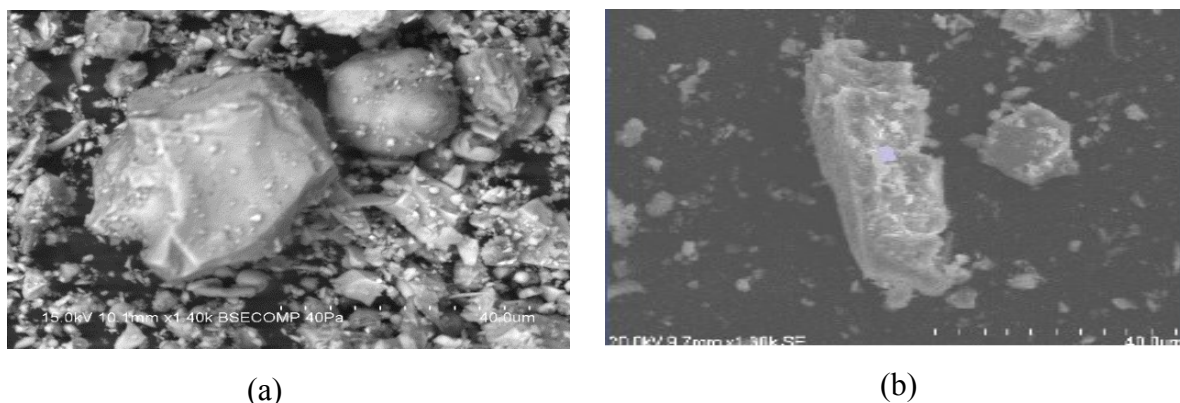


Figure 4.2 : Photo des grains des deux ciments Terc³ (a) et GU (b) par MEB

4.4.2 Fumée de silice

La fumée de silice utilisée dans ce projet est celle produite par la compagnie silicium Bécancour. Les propriétés physiques de la fumée de silice sont présentées dans le tableau 4.2. Le diamètre moyen des particules est de 0,2 μm . La Figure 4.3 montre une photo prise au MEB de la fumée de silice.

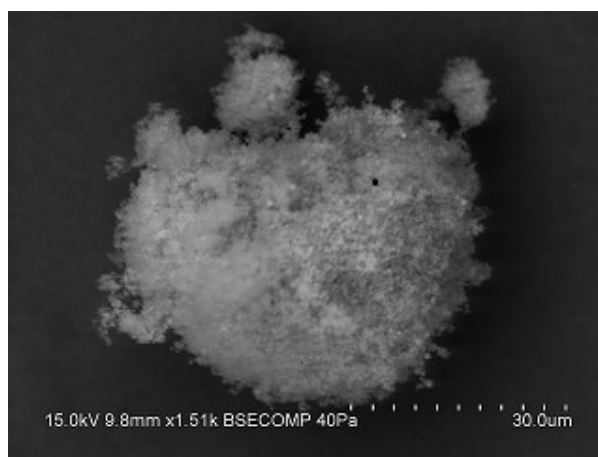


Figure 4.3 : : Photo des grains de fumée de silice par MEB

4.4.3 Poudre de verre

Comme définit précédemment, la poudre de verre est un ajout cimentaire alternatif de couleur blanche. Elle est obtenue par broyage des fragments de verre coloré. Elle a une propriété pouzzolanique grâce à sa teneur élevée en SiO_2 (environ 70%). Les propriétés physiques de la poudre de verre utilisée dans cette étude sont présentées dans le tableau 4.2. Comme le montre la figure 4.4, la forme des particules de la poudre de verre est généralement angulaire allongée.

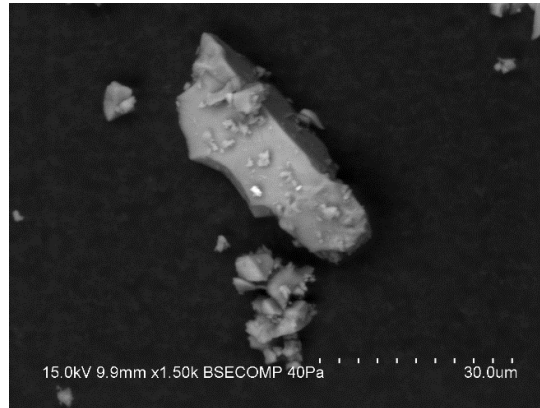


Figure 4.4 : Photo des grains de la poudre de verre par MEB

4.4.4 Cendres volantes

La cendre volante utilisée dans cette étude est de type F, qui se caractérise par une faible teneur en CaO ($< 10\%$). Les propriétés physiques de cendres volantes utilisées sont présentées dans le tableau 4.2. La photo prise par MEB met en évidence la forme sphérique de la cendre volante (Figure 4.5).

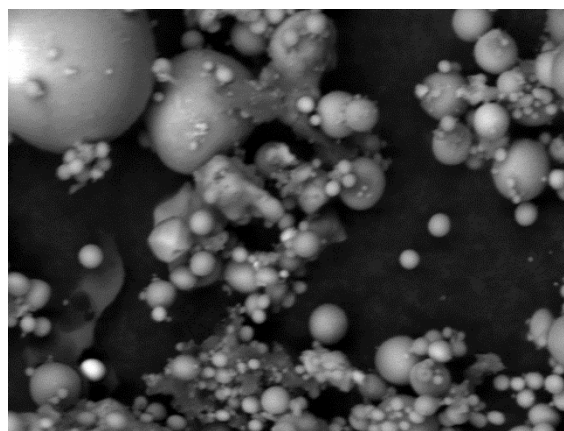


Figure 4.5 : Photo des grains de cendre volante par MEB

4.4.5 Granulats fins

Les propriétés du sable utilisés dans la confection des bétons et des MBE sont très importantes, puisque le calcul de la composition des MBE en dépend. Le sable utilisé dans cette étude est un sable naturel. Ses propriétés physiques sont présentées dans le tableau 4.4 et sa courbe granulométrique est montrée dans la Figure 4.6.

Tableau 4.4 : Propriétés physiques des granulats

Granulats	Densité brute sec (g/cm ³)	Absorption (%)
Sable 0-5 mm	2,67	1,09
Pierre 5-10 mm	2,72	0,42
Pierre 5-14 mm	2,73	0,49
Pierre 5-20 mm	2,76	0,48

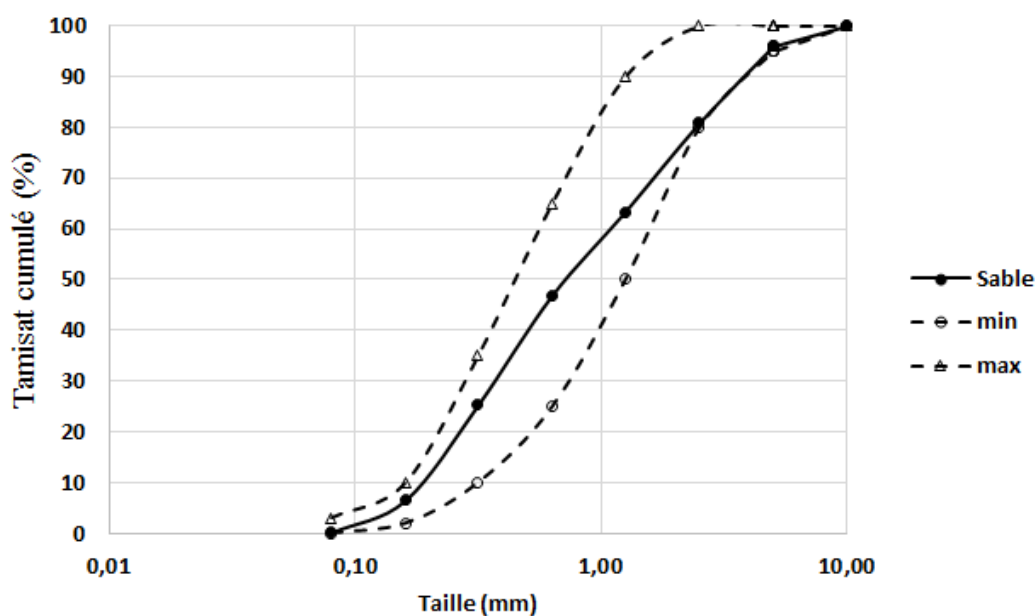


Figure 4.6 : Courbe granulométrique du sable

4.4.6 Gros granulats

Les gros granulats utilisés pour la confection des bétons sont des granulats concassés provenant de la carrière St-Dominique au Québec. Ces granulats ont un diamètre nominal

maximal respectivement de 14 et 20 mm. Leurs propriétés physiques sont présentées dans le tableau 4.2 et leur courbe granulométrique sont montrées dans les Figures (4.7) ; (4.8) et (4.9).

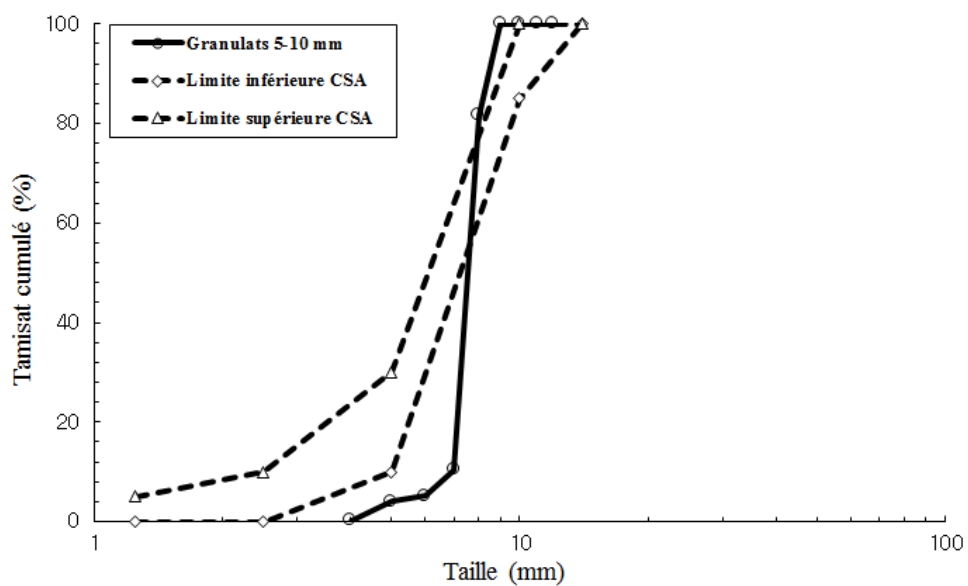


Figure 4.7 : Courbe granulométrique de la pierre 5-10 mm

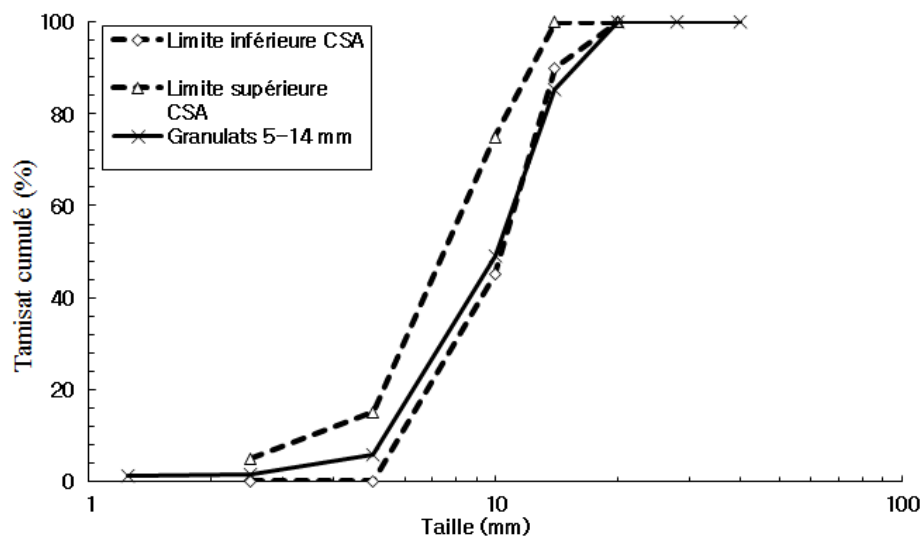


Figure 4.8 : Courbe granulométrique de la pierre 5-14 mm

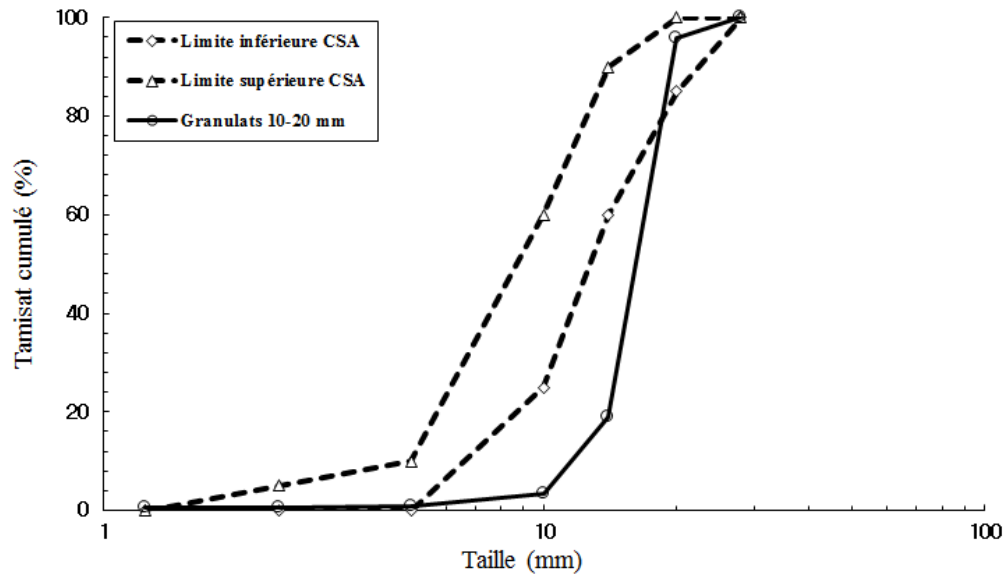


Figure 4.9 : Courbe granulométrique de la pierre 10-20 mm

4.4.7 Eau de gâchage

L'eau utilisée pour la confection des mélanges est une eau potable provenant de la ville de Sherbrooke. L'eau est exemptée de toute impureté pouvant compromettre les propriétés du béton.

4.5 Mesures des indices de Carr des ciments et matériaux cimentaires

4.5.1 Mesures des angles

Il s'agit de déterminer trois différents types d'angle de tas faisant intervenir ou non une énergie extérieure qui aura pour effet de diminuer les interactions entre les particules. Lors de son dépôt sur le talus et sur la spatule, la poudre va former des angles plus ou moins importants dépendamment de ses caractéristiques. Un angle important résulte de fortes interactions entre les particules au sein de l'échantillon.

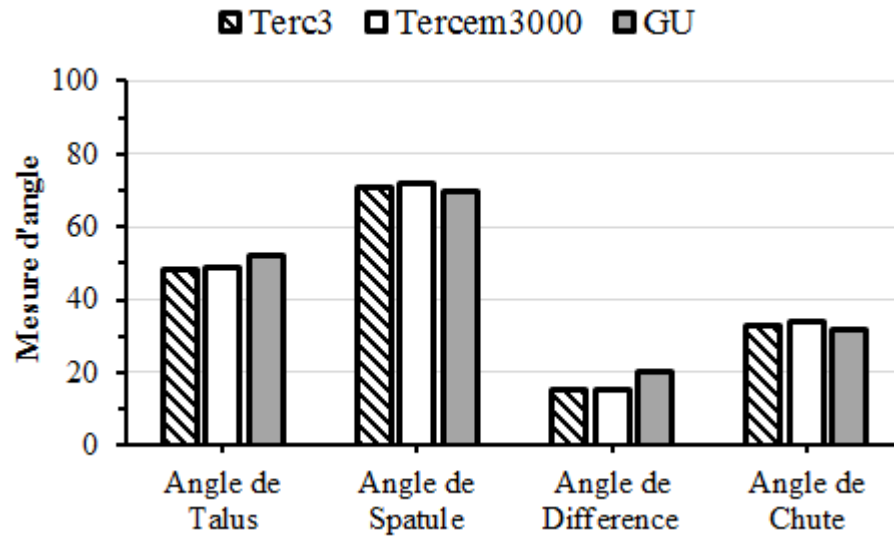


Figure 4.10: Mesures de différents angles des ciments

Les différentes mesures d'angle des ciments montrent que ce soit sous des conditions statiques (angle de talus et angle spatule) ou sous des conditions dynamiques (angle de différence et angle de chute) la différence est minime, on ne note pas de variation significative entre les différents angles. Cependant, sous des conditions statiques, on enregistre une légère augmentation de l'angle de spatule pour le ciment GU. Ceci montre que le ciment GU est plus cohésive que les liants ternaires Terc³ et Tercem3000.

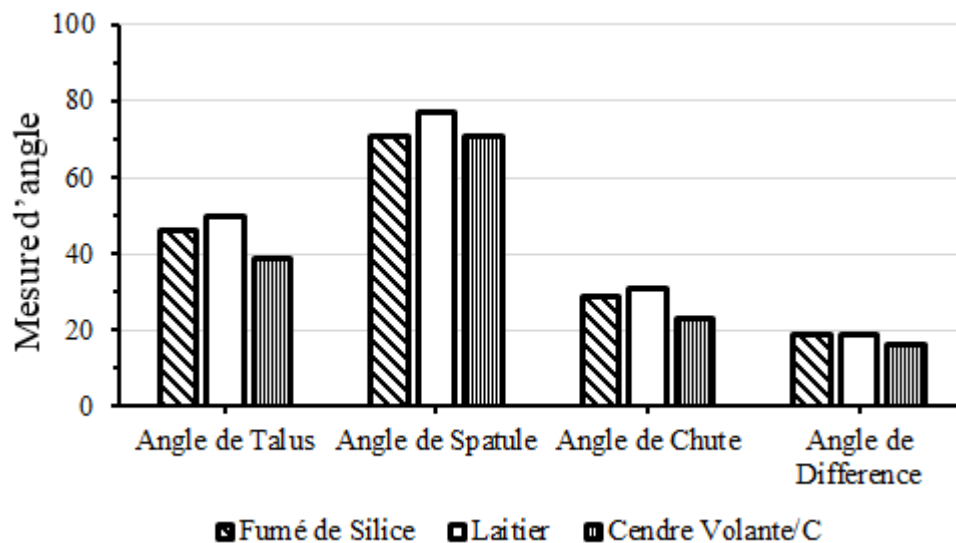


Figure 4.11 : Mesures de différents angles de la fumée de silice, de laitier et de cendre volante/C

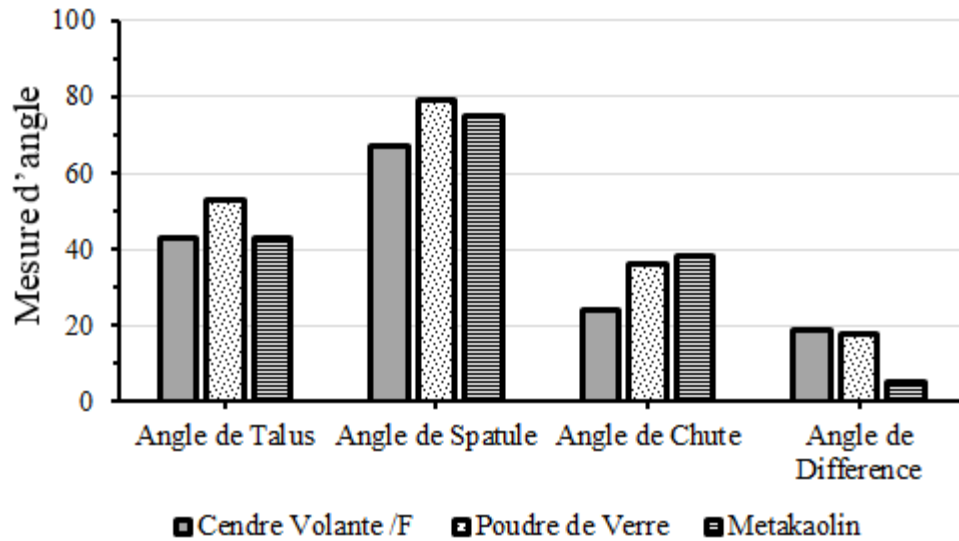


Figure 4.12 : Mesures de différents angles de la cendre volante/F, de la poudre de verre et du métakaolin

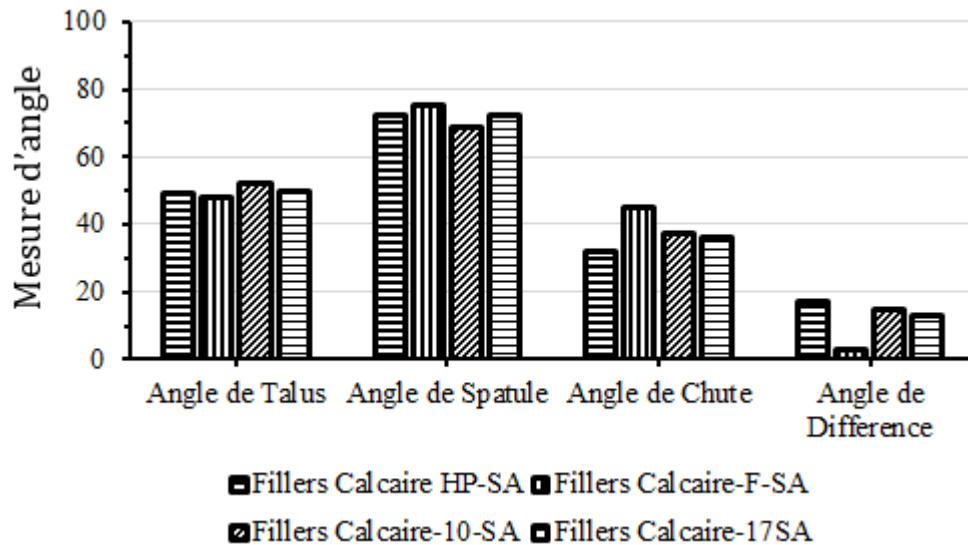


Figure 4.13 : Mesures de différents angles des Fillers calcaires

Pour tous les ajouts cimentaires et liants alternatifs caractérisés (Figures 4-11, 4-12 et 4-13), la variation entre les différentes mesures est minime sous des conditions statiques. Cependant, sous des conditions dynamiques, on constate un angle de chute plus important pour le fillers calcaire-F-SA. Ceci reflète une forte interaction entre les particules due à la grande finesse.

4.5.2 Mesures des densités apparentes et détermination de la compressibilité

La détermination des densités apparentes se font en deux temps. Ces essais permettent de trouver deux densité apparentes : une première densité est obtenue par gravité et sans apport extérieur d'énergie, c'est-à-dire sans tassement. Ces mesures représentent les densités apparentes aérées. Une autre densité est obtenue après avoir tasser la poudre, ce qui correspond à la densité tassée. Les valeurs de densité obtenus sont présentées dans les tableaux 4.5 et 4.6.

Tableau 4.5 : Valeurs des densités des ciments

Ciment	Densité non-tassée	Densité tassée
Tercem3000	0,721	1,378
GU	0,88	1,649
Terc ³	0,748	1,456

Tableau 4.6: Valeurs des densités des liants et liants alternatifs

Additions minérales	Densité non-tassée	Densité tassée
Fumée de Silice	0,171	0,308
Laitier	0,822	1,475
Cendre Volante/C	0,787	1,322
Cendre Volante/F	0,925	1,509
Poudre de verre	0,502	0,991
Filler Calcaire HP-SA	0,886	1,609
Filler Calcaire F-SA	0,487	1,024
Filler Calcaire 10-SA	0,808	1,505
Filler Calcaire 17-SA	0,809	1,506
Metakaolin	0,293	0,536

Par ailleurs, la compressibilité de la poudre permet d'apprécier son comportement dans le temps et sous l'influence d'un apport d'énergie. À partir des mesures de densités apparentes, il est possible de déterminer la compressibilité de la poudre de la façon suivante.

$$\%Compressibilité = \frac{(Dt - Dnt)}{Dt} \times 100$$

Dt : Densité tassée

Dnt : Densité non tassée

Les résultats de compressibilité ainsi calculés sont présentés dans les Figures 4.5 et 4.6.

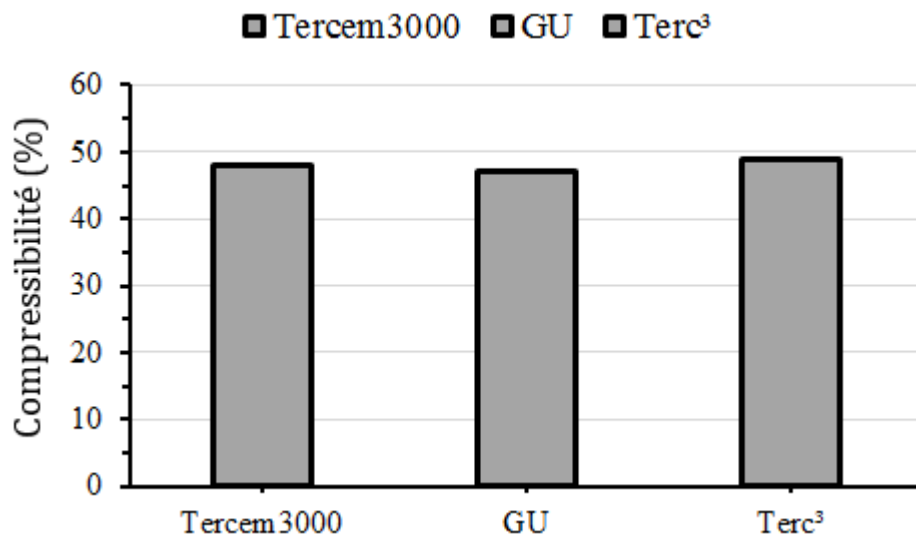


Figure 4.14 : Compressibilité des ciments

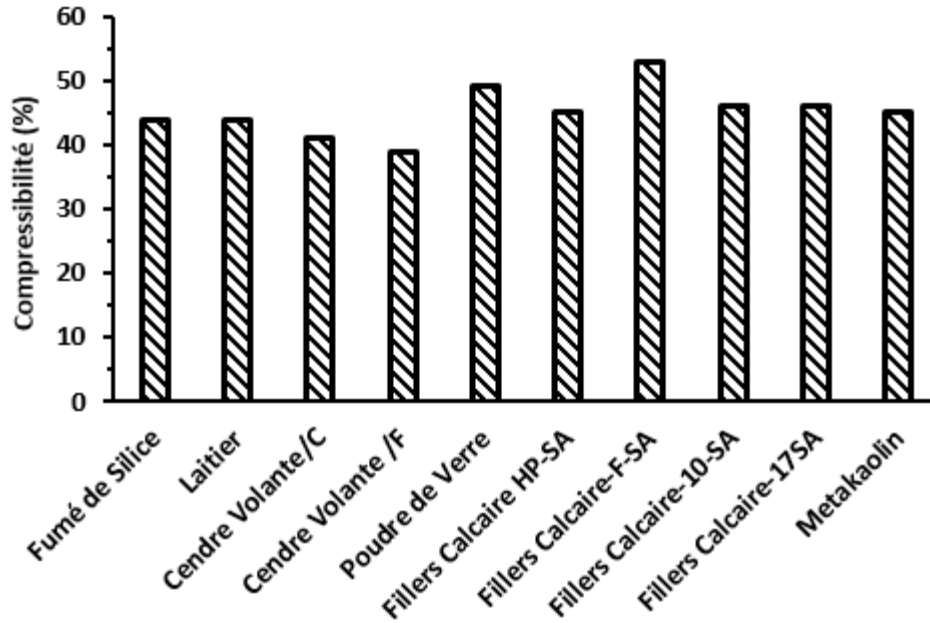


Figure 4.15 : Compressibilité des ajouts cimentaires et liants alternatifs

Les résultats de la compressibilité montrent que l'ensemble des ciments (Figure 4.14) et ajouts cimentaires (Figure 4.15) étudiés ont un caractère compressif. Ceci veut dire que sans l'ajout d'un fluidifiant compatible, ces poudres auront tendance à s'agglomérer très facilement et auront du mal à s'écouler. Aussi, ces poudres peuvent demander un dosage en fluidifiant relativement élevé dépendamment de sa compressibilité.

4.5.3 Mesure de la cohésion

La mesure de la cohésion peut nous renseigner sur la capacité des particules à se de agglomérer par voie sèche. Une relation empirique reliant les passants aux trois tamis va permettre de qualifier l'écoulement de la poudre. La cohésion est calculée à l'aide de formule suivante :

$$\%Cohésion = \frac{(5 * m_{150} + 3 * m_{75} + m_{45}) * 10}{(m_{150} + m_{75} + m_{45})}$$

m_{150} , m_{75} , m_{45} : les masses recueillies sur les tamis de 150, 75 et 45 μm

Les résultats de cohésion des ciments (Figure 4.16) et des ajouts cimentaires et liants alternatifs (Figure 4.17) montrent que :

- 1) Le liant Terc³ présente la plus forte cohésion par rapport aux deux types de ciment Tercem3000 et ciment GU. Les particules de Terc³ seront plus susceptibles à s'agglomérer que celles de Tercem3000 et du GU.
- 2) Par ailleurs, concernant les additions minérales caractérisés, on constate que le filler calcaire F-SA et le Méta kaolin, présentent la plus forte cohésion. En revanche la fumée de silice, les cendres volantes, le laitier et le poudre de verre présentent la plus faible cohésion, donc leur capacité à se agglomérés par voie sèche sera plus ou moins faible comparer au méta kaolin et au filler calcaire FSA.

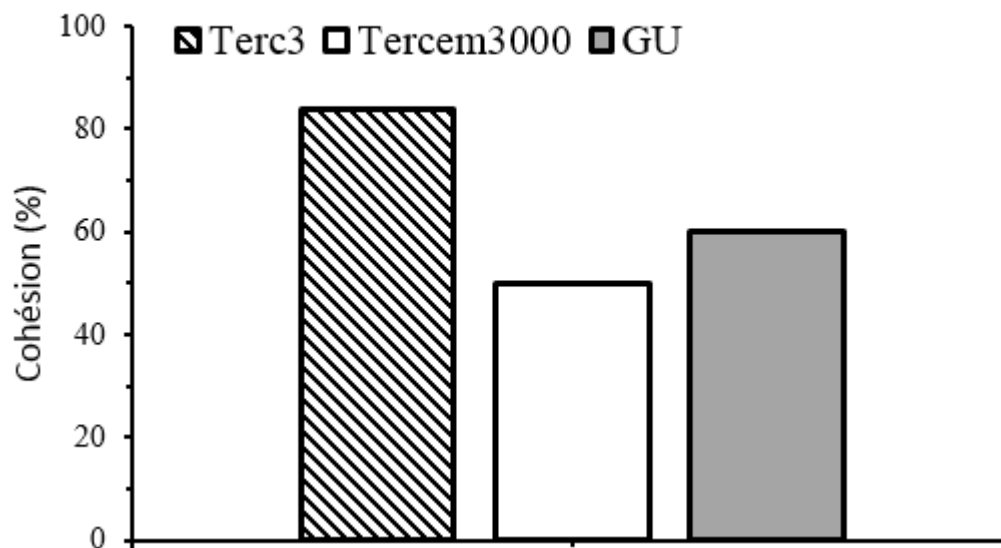


Figure 4.16 : Cohésion des ciments

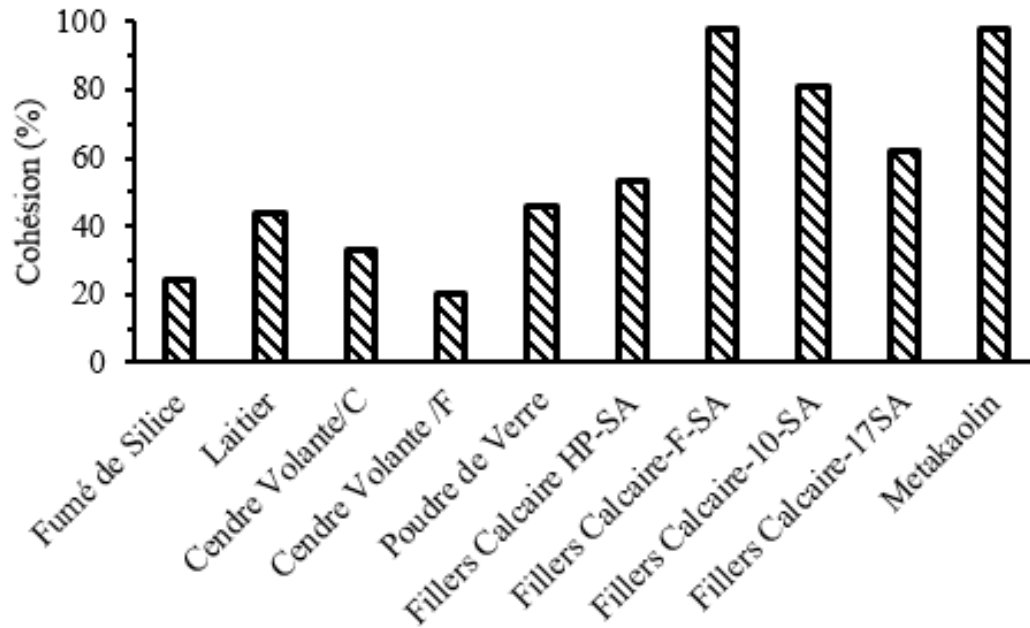


Figure 4.17 : Cohésion des ajouts cimentaires et liants alternatifs

4.5.4 Mesure de la dispersibilité

La dispersibilité caractérise le comportement de la poudre lors sa chute dans l'air, donc sa propension à se disperser naturellement dans l'air. On calcule alors un indice de dispersibilité comme suit :

$$\% \text{Dispersibilité} = \frac{m_{\text{initiale}} + m_{\text{recueillie}}}{m_{\text{initiale}}}$$

Les résultats de la dispersibilité des ciments (Figure 4.18) et des ajouts cimentaires et liants alternatifs (Figure 4.19) montrent des différences importantes entre les différentes poudres.

Dans le cas des ciments (Figure 4.18) caractérisé, le liant Terc^e présente une dispersibilité dans l'air bien inférieure à celui de ciment GUE et de Tercem3000. En revanche, dans le cas des ajouts cimentaires et liants alternatifs caractérisé (Figure 4.19), la poudre de verre, les cendres volantes de classes F et C, le laitier et la fumée de silice présentent la plus forte dispersibilité. Cependant, le Fillers calcaire F-SA et le métakaolin présente la plus faible dispersibilité.

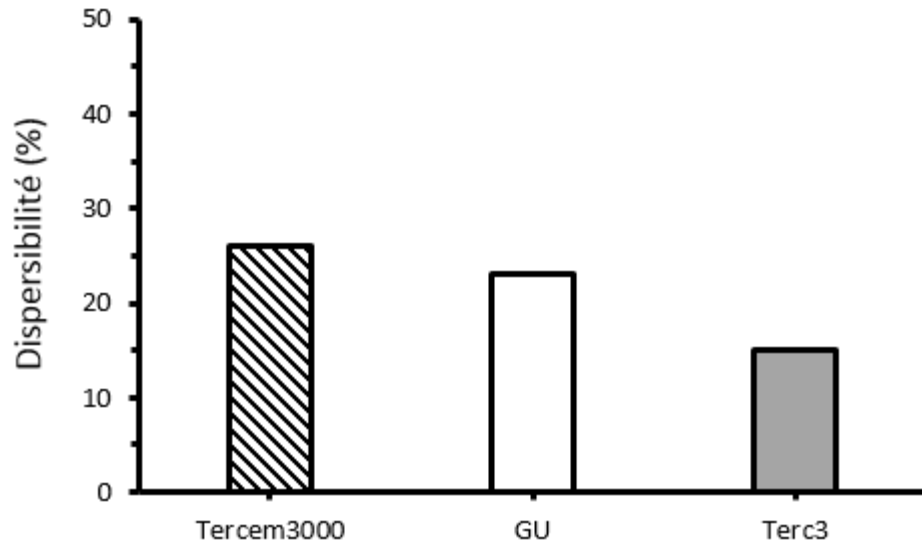


Figure 4.18 : Dispersibilité des ciments

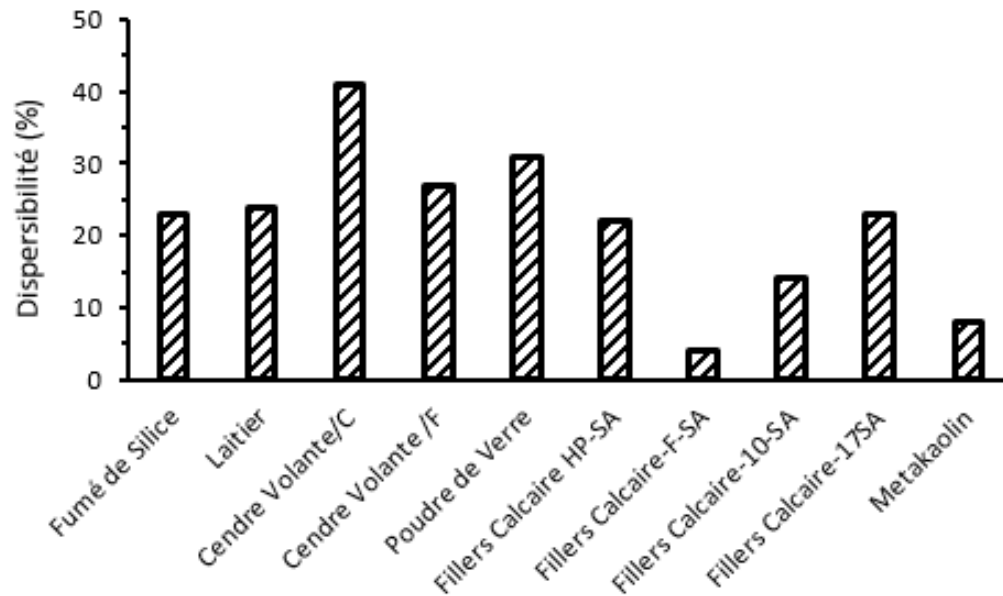


Figure 4.19 : Dispersibilité des ajouts cimentaires et liants alternatifs

4.5.5 Indices de Carr (coulabilité et déferlement)

La dernière mesure est celle de coulabilité et de déferlement. La mesure de coulabilité renseigne sur la capacité d'une poudre à s'écouler comme un liquide, alors que la mesure de déferlement nous renseigne sur l'aptitude de la poudre à s'écouler en vague [Diederich, 2010].

Les mesures de coulabilité et de déferlement des ciments (Figure 4.20) et des ajouts cimentaires (figure 4.21) étudiés montrent que :

1) Dans le cas des ciments (figure 4.20), les résultats montrent que le Terc³ et le Tercem3000 présentent la plus forte coulabilité par rapport au ciment GU, mais elles peuvent aussi se déferler plus facilement si elles ne sont pas bien contrôlées lors de leur utilisation.

2) Par ailleurs, les résultats obtenus avec les ajouts cimentaires (figure 4.21) montrent que la fumée de silice, le laitier, la poudre de verre et les cendres volantes de classe C et F ont une bonne coulabilité comparée aux autres ajouts cimentaires, mais le risque de déferlement reste très élevé.

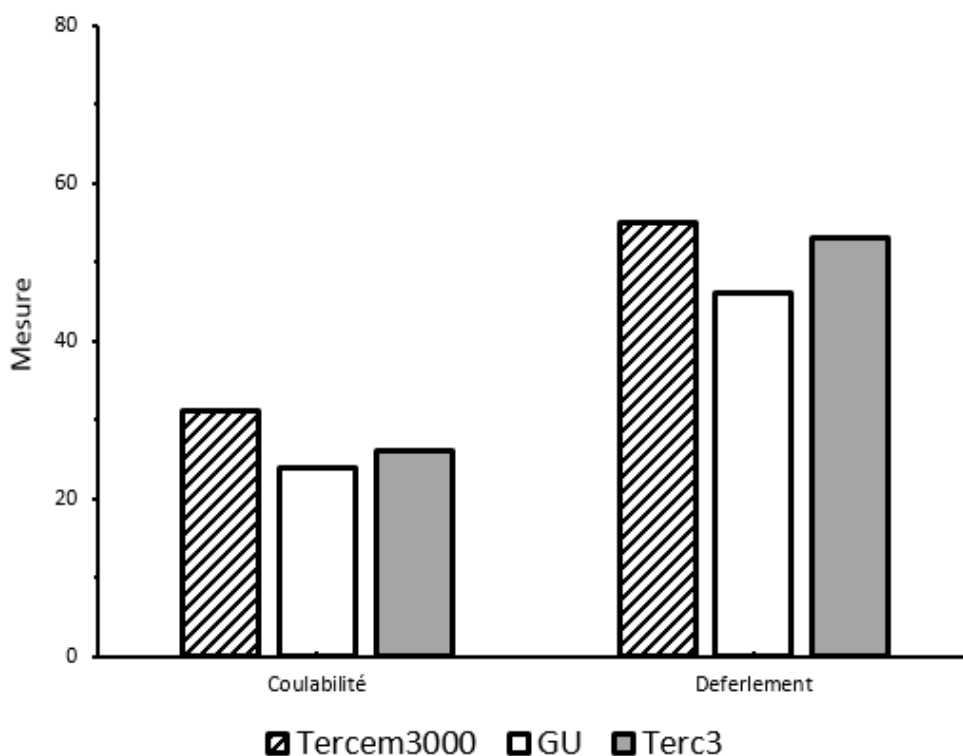


Figure 4.20 : Valeurs de coulabilité et déferlement des ciments

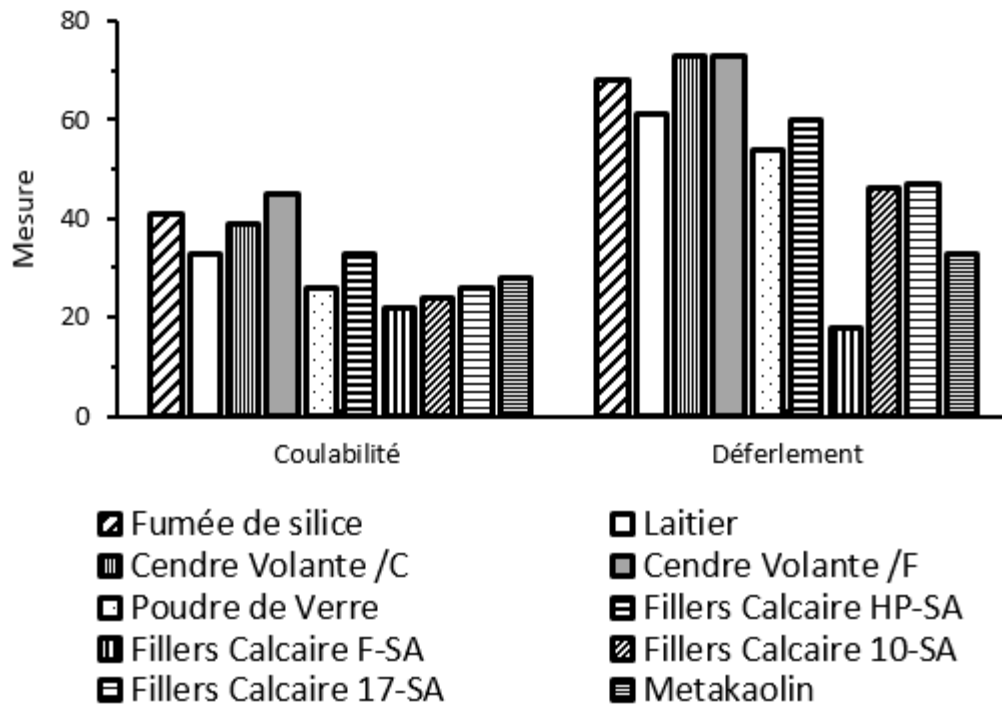


Figure 4.21 : Coulabilité et déferlement des ajouts cimentaires et liants alternatifs

Synthèse :

Les essais de caractérisation réalisés ont montré que les poudres étudiées ont des caractéristiques en termes coulabilité, dispersibilité, compressibilité et cohésion variables. Ces caractéristiques affectent leur capacité à l'écoulement dans un état sec, mais aussi dans les suspensions. Il sera important d'évaluer l'effet des combinaisons binaires des poudres.

4.6 Caractérisation des combinaisons binaires des poudres

Dans cette partie, il s'agit d'évaluer l'effet des combinaisons binaires des poudres sur leurs propriétés physiques. Différents systèmes binaires contenant le ciment GU et la poudre de verre sur leur comportement à l'écoulement. Le taux de remplacement de poudre de verre est de 15, 20 et 25%.

4.6.1 Mesures des angles des poudres

Les résultats (Figure 4.22) des mesures des différents angles des systèmes binaires (GU + PV) montrent que ce soit en conditions statique (angle de talus et angle spatule) ou en condition

dynamique (angle de différence et angle de chute), la différence entre les systèmes contenant de 15 à 25% de la poudre de verre est minime. Cependant, sous des conditions statiques on enregistre une légère augmentation de l'angle de spatule à 20% de taux de remplacement de poudre de verre. Le remplacement partiel de ciment par de la poudre de verre n'a pas d'effet notable sur les angles des systèmes binaires étudiés.

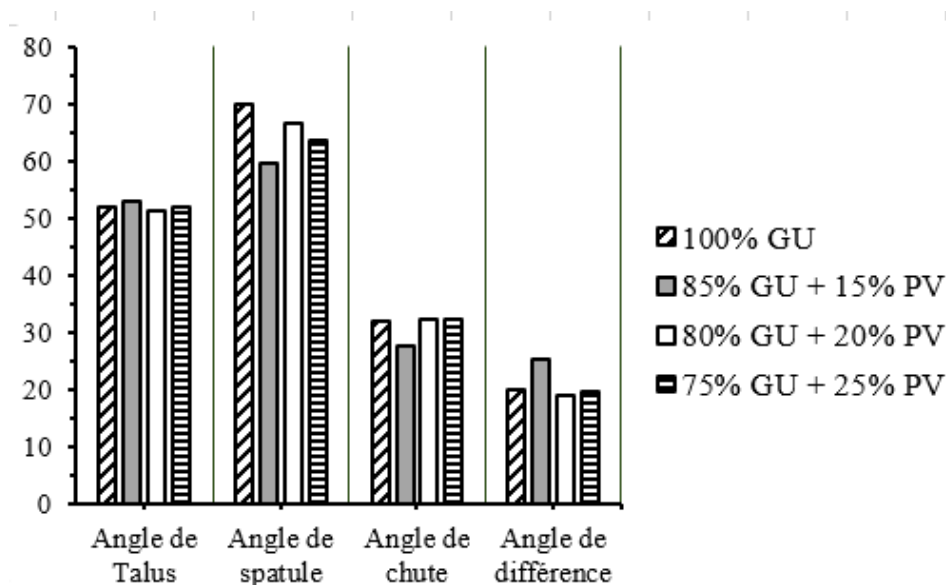


Figure 4.22: Mesures de différents angles des combinaisons binaires

4.6.2 Mesures des densités apparentes et détermination de la compressibilité des systèmes GU + PV

Les résultats (Figure 4.23) ci-dessous montrent la relation entre la compressibilité et la densité apparente. On constate que plus le taux de remplacement augmente, plus la densité apparente diminue. Alors que la compressibilité augmente légèrement. Ceux-ci montrent que plus le pourcentage de la poudre de verre augmente, plus la capacité d'agglomération de poudre augmente, ce qui peut nécessiter l'utilisation d'un adjuvant compatible afin d'éviter l'agglomération et faciliter leur écoulement.

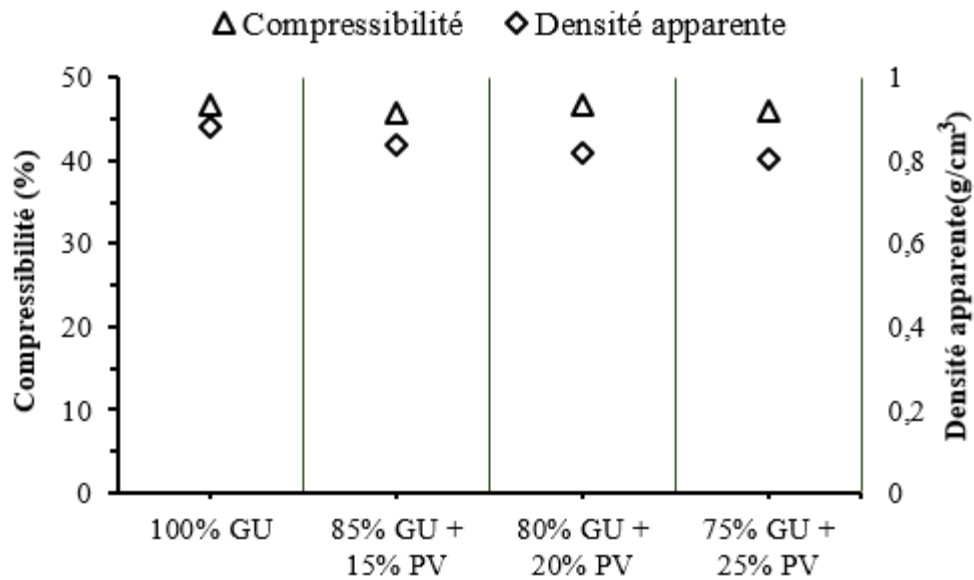


Figure 4.23 : Compressibilité et densité apparente des systèmes GU + PV

4.6.3 Mesure de la dispersibilité et de la cohésion

Les résultats (Figure 4.24) ci-dessous montrent que :

Le remplacement de ciment par de la poudre de verre diminue considérablement la cohésion par rapport à 100% de ciment GU. La plus grande diminution a été observée avec le taux de remplacement de 20%. Cette diminution est probablement liée à la forme angulaire de la poudre de verre mais aussi aux faibles interactions entre les particules. Par ailleurs, on constate que l'augmentation de pourcentage de remplacement de poudre de verre de 15 à 25% diminue la dispersibilité des systèmes binaires.

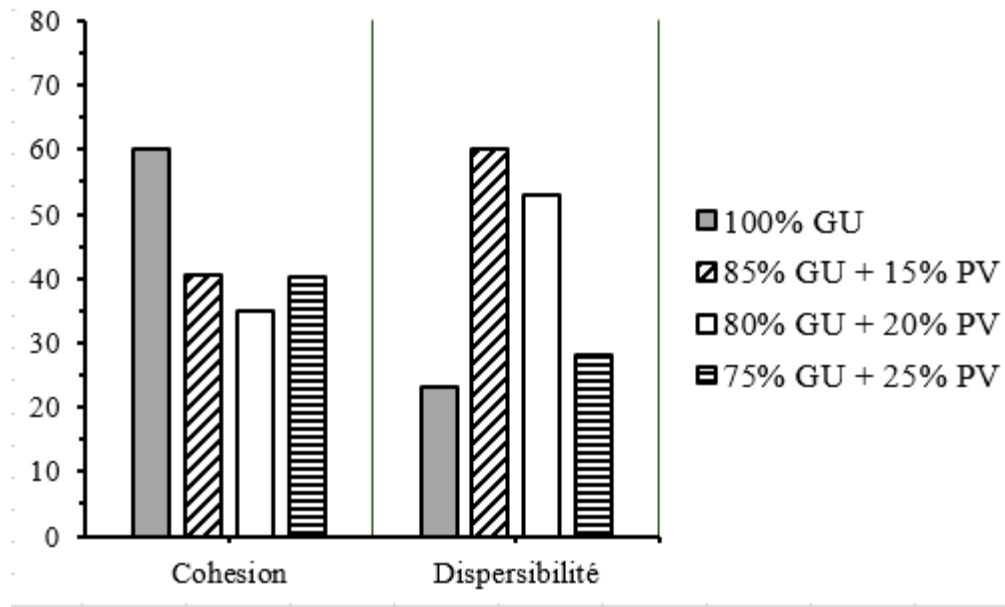


Figure 4.24: Mesures de dispersibilité et cohésion des systèmes GU + PV

4.6.4 Détermination des Coulabilité et déferlement des poudres binaires

Les résultats (Figure 4.25) montrent une légère augmentation de la coulabilité avec 15% de remplacement de poudre de verre mais en revanche l'augmentation de la poudre verre de 20% à 25% diminue la coulabilité du mélange binaire contenant de la poudre de verre. Par ailleurs, le déferlement augmente significativement à 15% et diminue de 20% à 25% de remplacement. Cependant, on peut dire que plus la coulabilité de la poudre de verre est bonne plus le risque de déferlement sera grand.

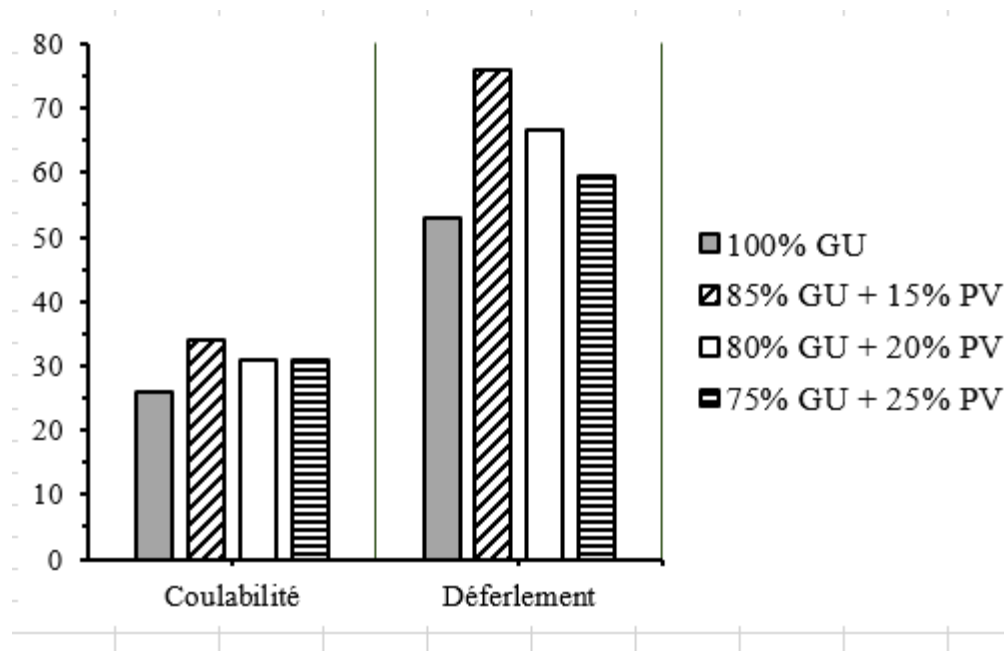


Figure 4.25 : Mesure de coulabilité et déferlement de poudre binaire

4.7 Conclusions

La sélection des ajouts cimentaires est cruciale dans la conception des bétons fluides à rhéologie adaptée, sans oublier évidemment la nécessité d'utiliser des adjuvants chimiques compatibles et performant (superplastifiants et agents de viscosités).

Cette phase de caractérisation vise à :

1. Caractériser les liants cimentaires et les additions minérales notamment en effectuant des mesures des indices d'écoulement pour évaluer la compressibilité, l'agglomération et la cohésion des poudres.
2. Identifier les caractéristiques physiques influençant leur comportement dans les BFRA.

Les résultats obtenus dans cette phase montrent que :

Les ciments Terc3 et le Tercem3000 présentent la plus forte coulabilité par rapport au ciment GU.

La poudre de verre, les cendres volantes de classes F et C, le laitier et la fumée de silice présentent la plus forte dispersibilité et présentent une bonne coulabilité.

Par ailleurs, dans le cas de caractérisation des combinaisons binaires des poudres les résultats montrent que :

Le remplacement de ciment par de la poudre de verre diminue considérablement la cohésion par rapport à 100% de ciment GU. La plus grande diminution a été observée avec le taux de remplacement de 20%.

Plus le taux de remplacement de la poudre de verre augmente, plus la densité apparente diminue. Alors que et la compressibilité augmente légèrement.

La capacité d'agglomération de la poudre de verre augmente avec le taux de remplacement, ce qui peut nécessiter l'utilisation d'un adjuvant compatible afin d'éviter agglomération et faciliter leur écoulement.

Plus la coulabilité de la poudre de verre est bonne plus le risque de déferlement sera grand.

Cet indice peut avoir un effet sur la demande en eau et adjuvants pour avoir une rhéologie donnée.

La Phase 1 du projet de recherche nous a permis de choisir la poudre de verre et la cendre volante de type F pour l'étude sur le mortier de béton équivalent (Phase 3).

Chapitre 5 : Optimisation des formulations de BFRA de référence

Dans cette phase d'optimisation, il s'agit d'évaluer la compatibilité et l'efficacité de différentes combinaisons superplastifiant et agent entraîneur d'air (SP/AEA) pour la formulation des BFRA. Des combinaisons SP/AEA compatibles et efficaces, en termes de la rhéologie et de son maintien dans le temps ainsi que des propriétés mécaniques, pour la formulation des BFRA sont identifiées. Parmi les SP sélectionnées pour les BSAP destinés pour les constructions résidentielles quatre sont de type polycarboxylate (A1, A2, B2, B3) avec deux types de AEA (A4, B6) et les deux autres sont de type polynaphtalène (PNS1 et PNS2). Par ailleurs, pour les BSAP destinés pour les infrastructures quatre des six superplastifiant sélectionnées sont de type polycarboxylate (A1, A2, B2, C2) et un de type polynaphtalène (PNS2) avec deux types de AEA (A4, B6). Il est important de rappeler que les BSAP résidentiels sont proportionnés avec deux rapports E/L de 0,50 et 0,55. Par ailleurs, les BSAP destinés pour les infrastructures sont proportionnés avec deux rapports E/L de 0,38 et 0,40. Les BFRA étudiés sont formulés avec un liant ternaire constitué approximativement de 75% de ciment GU, 20% de cendres volantes et 5% de fumée de silice (TerC³).

5.1 Types des BFRA

Les types des BFRA considérés dans cette étude sont :

- Les bétons semi-autoplaçants (BSAP) destinés pour les constructions résidentielles ;
- Les bétons semi-autoplaçants (BSAP) destinés pour les infrastructures.

5.2 Paramètres de formulation des BFRA

Les paramètres de formulation et propriétés visées de chaque type des BFRA étudiés sont présentés dans les tableaux 5.1 et 5.2.

Tableau 5.1 : Paramètres de formulation et propriétés visées du BSAP résidentiel

BSAP résidentiel		Valeurs typiques
Paramètres de formulation	Teneur en liant (kg/m ³)	360 - 420 (400)
	Eau/Liant (E/L)	0,45 - 0,55 (0,50)
	Volume de la pâte (%)	28 - 32 (30)
	Volume de sable/Volume total des granulats (%)	44 - 55 (55,6 @ n = 0,4)
	Grosseur maximale des gros granulats, ϕ_{\max} (mm)	20
Propriétés mesurées	<u>Propriétés à l'état frais</u>	
	Étalement (mm)	500 ± 50
	Capacité de passage (Étal. – J-Ring)	≤ 50 mm
	H ₂ /H ₁	≥ 0,7
	Volume d'air (%)	4 - 7
	Tassement (%)	≤ 0,5 %
	<u>État durci</u>	
	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	20 – 25 MPa
	<u>Durabilité</u>	
	Kcl (coulombs)	< 1000 à 56 jours

Tableau 5.2 : paramètres de Formulation et propriétés visées du BSAP Pour les infrastructures

BSAP infrastructure		Valeurs typiques
Paramètres de formulation	Teneur en liant (kg/m ³)	380 - 500 (440)
	Eau/Liant (E/L)	0,34 - 0,42 (0,38)
	Volume de la pâte (%)	30 - 38 (34)
	Volume de sable/Volume total des granulats (%)	47 - 53 (55,6 @ n = 0,4)
	Grosseur maximale des gros granulats, ϕ_{\max} (mm)	20
Propriétés mesurées	<u>Propriétés à l'état frais</u>	
	Étalement (mm)	500 ± 30
	Capacité de passage (Étal. - JRing)	≤ 50 mm
	H ₂ /H ₁	≥ 0,7
	Volume d'air (%)	5 - 8
	Tassement (%)	≤ 0,5 %
	<u>État durci</u>	
	Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	> 35 MPa
	<u>Durabilité</u>	
	Kcl (coulombs)	< 1000 à 56 jours

5.3 Formulations des BFRA optimisées

Les formulations des BSAP résidentiel proportionnées avec les rapports E/L de 0,50 et 0,55 sont présentées dans les tableaux 5.3 et 5.4, Par ailleurs, les formulations des BSAP destinés pour les infrastructures ayant un rapport E/L de 0,38 et 0,40, sont présentées dans les Tableaux 5.5 et 5.6,

Tableau 5.3 : Formulations optimisées de BSAP résidentiel (E/L = 0,50)

		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Pâte (kg/m³)	Eau	180					
	Liant	360					
	E/L	0,50					
Granulats (kg/m³)	Sable	955	955	955	955	955	955
	5 - 10 mm	250	250	250	250	250	250
	5 - 14 mm	300	300	300	300	300	300
	10 - 20 mm	235	235	235	235	235	235
Teneur totale des gros granulats (kg/m³)		785					
Rapport sable/ (sable + GG)		0,55					
Adjuvants	SP (ml/100 kg de liant)	440	370	670	520	950	1020
	AEA (ml/100 kg de liant)	3	7	6	0	8	40
	AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0	0

Tableau 5.4 : Formulations optimisées de BSAP résidentiel (E/L = 0,55)

		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Pâte (kg/m³)	Eau	187					
	Liant	340					
	E/L	0,55					
Granulats (kg/m³)	Sable	952	952	952	952	952	952
	5 - 10 mm	246	246	246	246	246	246
	5 - 14 mm	298	298	298	298	298	298
	10 - 20 mm	235	235	235	235	235	235
Teneur totale des gros granulats (kg/m³)		779					
Rapport Sable/ (Sable + GG)		0,55					
Adjuvants	SP (mL/100 kg de liant)	354	236	494	441	882	941
	AEA (mL/100 kg de liant)	4	7	6	3	27	44
	AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0	0

Tableau 5.5 : Formulations optimisées de BSAP infrastructures (E/L = 0,38)

		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Pâte (kg/m³)	Eau	180				
	Liant	475				
	E/L	0,379 (0,38)				
Granulats (kg/m³)	Sable	880	880	880	880	880
	5 - 10 mm	225	225	225	225	225
	5 - 14 mm	275	275	275	275	275
	10 - 20 mm	215	215	215	215	215
Teneur totale des gros granulats (kg/m³)		715				
Rapport sable/ (sable + GG)		0,55				
Adjuvants	SP (mL/100 kg de liant)	496	380	338	749	1076
	AEA (mL/100 kg de liant)	13	14	3	1	32
	AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0

Tableau 5.6 : Formulations optimisées de BSAP infrastructures (E/L = 0,40)

BSAP infrastructurel (E/L = 0,40)		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Pâte (kg/m³)	Eau	168				
	Liant	420				
	E/L	0,40				
Granulats (kg/m³)	Sable	925	925	925	925	925
	5 - 10 mm	239	239	239	239	239
	5 - 14 mm	289	289	289	289	289
	10 - 20 mm	228	228	228	228	228
Teneur totale des gros granulats (kg/m³)		756				
Rapport sable/(sable+GG)		0,55				
Adjuvants	SP (mL/100 kg de liant)	472	358	375	607	1130
	AEA (mL/100 kg de liant)	10	8	4	5	43
	AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0

5.4 Présentation des résultats des BFRA étudiés

Les propriétés à l'état frais des BSAP résidentiel proportionnées avec les rapports E/L de 0,50 et 0,55 sont présentés dans les Tableaux 5.7 et 5.8, alors que les propriétés mécaniques sont présentées dans les Tableaux 5.9 et 5.10, par ailleurs, les propriétés à l'état frais des BSAP destinés pour les infrastructures ayant un rapport E/L de 0,38 et 0,40, sont présentés dans les Tableaux 5.11 et 5.12, alors que les propriétés mécaniques sont présentées dans les Tableaux 5.13 et 5.14.

Tableau 5.7 : Propriétés des formulations optimisées de BSAP résidentiel (E/L = 0,50)

Bsap résidentiels (E/L=0.50)		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		550	545	495	515	480	510
T40 (s)		1,8	3,4	1,4	1,3	2,0	2,4
Étalement (mm)	15 min	425	465	440	425	455	470
	30 min	410	440	370	390	405	465
	45 min	300	415	375	345	345	435
Jring (mm)		525	520	475	485	475	480
$(\phi - \text{Jring})$ (mm)		25	25	20	30	5	30
Temps d'écoulement (s)		3,6	5,1	4,9	4,3	4,0	3,3
Boite L (h1/h2)		0,03	0,44	0,18	0,25	0,24	0,28
Boite L (hm/h2)		0,23	0,67	0,45	0,43	0,43	0,54
Tassement (%)		0,02	0,35	0,15	0,11	0,04	0,24
Seuil d'écoulement (Pa)		88,4	46,4	75,1	96,5	64,5	55,7
Viscosité plastique (Pa.S)		10,8	17	8,4	12,2	9	6,4
Indice de ségrégation (%)		12	10,8	13	12.3	11	11,9

Tableau 5.8 : Propriétés des formulations optimisées des BSAP résidentiels (E/L = 0,55)

BSAP résidentiels (E/L = 0,55)		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		535	475	470	490	475	510
T40 (s)		1,92	1,88	2,20	2,11	2,02	1,70
Étalement (mm)	15 min	520	455	420	415	415	490
	30 min	420	405	400	370	340	450
	45 min	410	395	375	335	300	430
J-Ring (mm)		525	465	430	440	455	475
$(\phi - \text{J-Ring})$ (mm)		10	10	40	50	20	35
Temps d'écoulement (s)		4,04	3	3,28	4,88	4,81	3,20
Boite L (H ₂ /H ₁)		0,8	0,72	0,7	0,73	0,72	0,77
Tassement (%)		0,01	0,25	0,16	0,09	0,03	0,19
Seuil d'écoulement (Pa)		83	41	70	98	55	50
Viscosité plastique (Pa. S)		12	16	9	14	8	5
Indice de ségrégation (%)		10,5	9,7	11,2	12	9,8	9,6

Tableau 5.9 : Résistances à la compression des BSAP résidentiels (E/L = 0,50)

BSAP résidentiels (E/L = 0,50)	Âge (jours)	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Résistance à la Compression (MPa)	1	14 (0,4)	15 (0,8)	17 (2,0)	17 (1,1)	14 (0,5)	13 (0,7)
	3	21 (0,6)	25 (0,5)	28 (0,2)	27 (1,2)	23 (1,5)	23 (1,6)
	7	28 (2,4)	32 (1,1)	36 (1,6)	32 (0,4)	29 (1,2)	28 (1,9)
	28	39 (0,2)	45 (0,9)	47 (1,2)	44 (1,1)	43 (1,3)	42 (1,3)
	56	44 (1,5)	49 (0,9)	49 (1,3)	50 (0,8)	47 (0,7)	44 (0,1)

Tableau 5.10 : Résistances à la compression des BSAP résidentiels (E/L = 0,55)

BSAP résidentiels (E/L = 0,55)	Âge (jours)	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Résistance à la Compression (MPa)	1	12,3 (0,4)	12,0 (0,4)	11,9 (0,3)	12,0 (0,9)	13,0 (1,0)	10,3 (0,18)
	3	19,7 (0,12)	20,0 (0,1)	18,6 (0,1)	16,17 (0,2)	19,5 (0,6)	14,4 (0,1)
	7	25,2 (0,3)	24,46 (0,7)	25,81 (0,6)	24,7 (0,4)	26,1 (0,2)	20,3 (0,3)
	28	32,4 (0,5)	31,6 (0,6)	29,8 (0,4)	37,1 (0,8)	35,2 (0,4)	28,6 (0,5)
	56	43,3 (0,4)	42,5 (0,5)	40,0 (0,3)	42,3 (0,6)	45,5 (0,6)	38,0 (0,3)

Tableau 5.11 : Propriétés des formulations de BSAP optimisées pour les infrastructures

(E/L = 0,38)

BSAP infrastructurel (E/L = 0,38)		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		555	560	545	515	535
T40 (s)		3,0	2,2	1,8	2,3	2,3
Étalement (mm)	15 min	510	530	510	490	520
	30 min	440	505	470	485	505
	45 min	395	500	410	500	495
J-Ring (mm)		520	545	525	500	535
(ϕ - J-Ring) (mm)		35	15	20	15	0
Temps d'écoulement (s)		7,0	5,7	6,4	12,0	4,7
Boite L (H_2/H_1)		0,85	0,69	0,54	0,60	0,69
Boite L (H_m/H_2)		0,88	0,82	0,60	0,76	0,75
Tassement (%)		0,03	0,01	0,12	0,19	0,5
Seuil d'écoulement (Pa)		94	44	60	57	38
Viscosité plastique (Pa. S)		33	22	22	35	21
Indice de ségrégation (%)		10,1	10,6	9,3	9,3	8,5

Tableau 5.12 : Propriétés des formulations de BSAP optimisées pour les infrastructures

(E/L = 0,40)

BSAP infrastructurel (E/L = 0,40)		PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		525	515	530	520	535
T40 (s)		2,35	2,01	2,03	2,43	2,10
Étalement (mm)	15 min	420	445	435	520	510
	30 min	315	405	375	515	420
	45 min	280	310	325	510	390
J-Ring (mm)		490	480	490	485	525
(ϕ - J-Ring) (mm)		35	30	40	35	10
Temps d'écoulement (s)		6,60	6,31	6,93	6,95	5,50
Boite L (H_2/H_1)		0,81	0,66	0,73	0,70	0,77
Tassement (%)		0,05	0,03	0,09	0,21	0,32
Seuil d'écoulement (Pa)		83	36	64	62	36
Viscosité plastique (Pa. S)		28	19	21	32	18
Indice de ségrégation (%)		11,4	8,7	9,5	8,3	6,1

Tableau 5.13 : Résistances à la compression des BSAP optimisés pour les infrastructures

(E/L = 0,38)

BSAP infrastructuel (E/L = 0,38)	Âge (Jours)	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Résistance à la compression (MPa)	1	28,8 (1,3)	26,3 (0,5)	30,7 (0,5)	38,0 (0,7)	25,8 (0,9)
	3	38,8 (0,2)	36,9 (0,6)	42,0 (0,5)	49,2 (1,3)	35,1 (1,2)
	7	44,1 (1,7)	44,1 (0,5)	53,3 (0,5)	56,4 (0,4)	42,0 (0,7)
	28	60,8 (0,9)	58,9 (0,7)	58,5 (1,6)	62,5 (1,7)	56,2 (0,9)
	56	61,2 (0,9)	63,6 (0,5)	68,9 (0,6)	74,8 (1,5)	62,3 (0,4)

Tableau 5.14 : Résistances à la compression des BSAP optimisés pour les infrastructures

(E/L = 0,40)

BSAP infrastructuel (E/L = 0,40)	Âge (Jours)	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Résistance à la compression (MPa)	1	26,6 (0,9)	28,7 (0,1)	28,1 (1,6)	29,8 (1,6)	23,0 (0,7)
	3	34,3 (0,5)	33,0 (0,7)	37,3 (1,2)	34,4 (0,7)	27,4 (0,4)
	7	40,5 (0,6)	42,2 (1,5)	44,5 (0,8)	44,2 (0,2)	37,0 (0,5)
	28	48,4 (0,3)	49,3 (1,6)	50,3 (1,1)	51,6 (0,7)	46,2 (0,6)
	56	56,2 (1,5)	57,1 (1,4)	56,2 (1,3)	58,4 (0,5)	53,1 (0,4)

5.5 Propriétés des BSAP résidentiels

5.5.1 Étalements

Les Figures 5.1 et 5.2 illustrent les valeurs de l'étalement obtenus avec les BSAP à 10, 15, 30 et à 45 minutes après le premier contact entre l'eau et le ciment. On constate que tous les bétons ont atteint l'étalement visé de 500 ± 50 mm. Aussi, les mélanges étudiés sont stables (Tableaux 5.7 et 5.8).

Pour le BSAP confectionné avec un rapport E/L de 0,50, un volume de pâte de 30% et une teneur en liant de 360 Kg/m³, on observe que les mélanges ont des étalements à l'intérieur de l'intervalle des valeurs visées (500 ± 50 mm) indépendamment du type et de la teneur en SP. Par ailleurs, la rétention d'étalement est meilleure avec les systèmes A2-A4 et PNS2. Ceci peut traduire une meilleure compatibilité de ces systèmes avec le liant utilisé.

Dans le cas de BSAP confectionnés avec un rapport E/L de 0,55, et une teneur en liant de 340 Kg/m³, la combinaison A1-A4 et le PNS2 ont montré une meilleure rétention de la fluidité jusqu'à 15 min. Au-delà de 15 min, les combinaisons A1-A4, A2-A4 et B1-B6 montrent une performance similaire alors que le PNS2 est légèrement meilleure. Ceci peut s'expliquer par une meilleure compatibilité de ces combinaisons avec le liant utilisé.

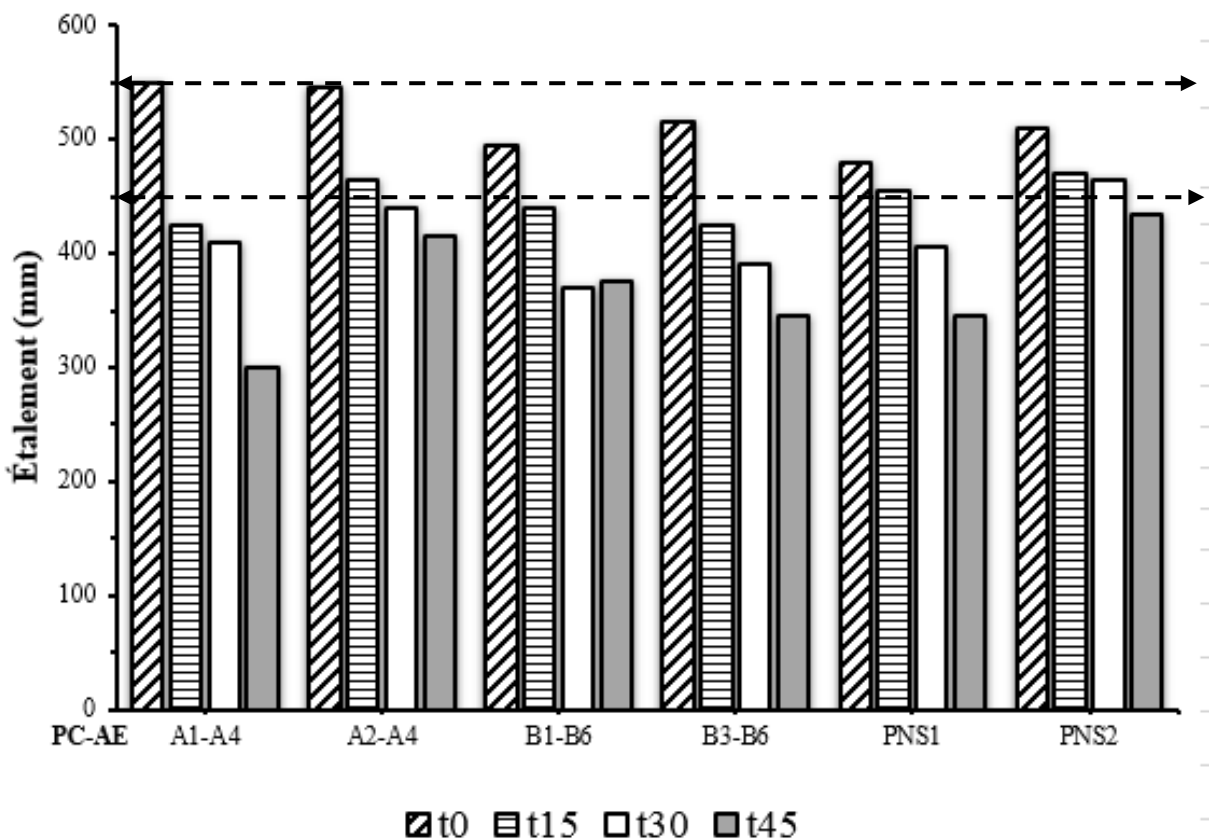


Figure 5.1 : Étalement des BSAP résidentiels (E/L = 0,50)

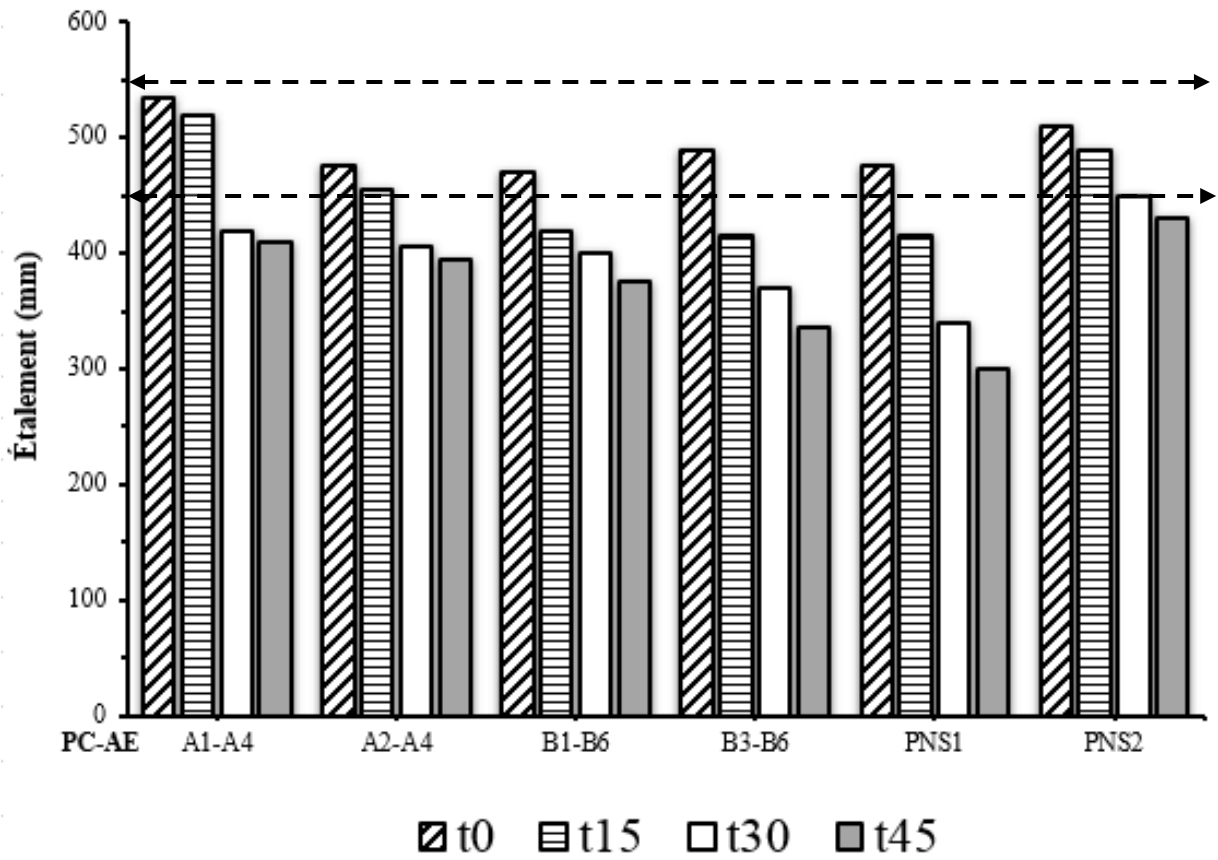


Figure 5.2 : Étalement des BSAP résidentiels ($E/l = 0,55$)

5.5.2 Étalement à l'anneau (J-ring)

La norme ASTM C 1621 indique que si la différence entre la mesure de l'étalement et celle du J-ring ($E - J$) est inférieure à 50 mm, alors le béton a une bonne aptitude au passage. Les résultats présentés dans les figures 5.3 et 5.4, montrent que tous les BSAP ont une bonne capacité de passage. Cette bonne aptitude de passage est probablement liée au caractère semi-auto plaçant, car le blocage survient si le béton est trop fluide et instable (ségrégation dynamique) ou trop plastique.

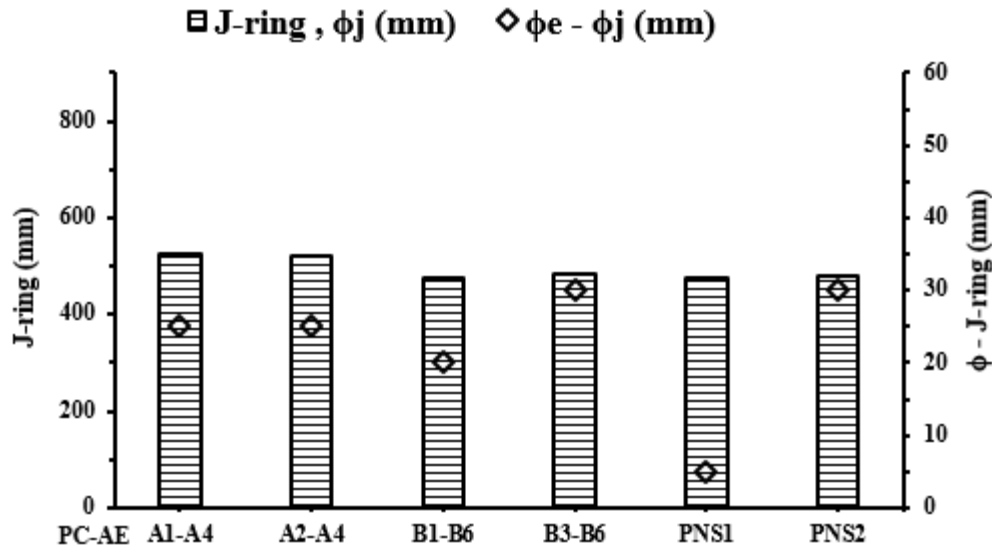


Figure 5.3 : Capacité de passage des BSAP-résidentiels (E/L = 0,50)

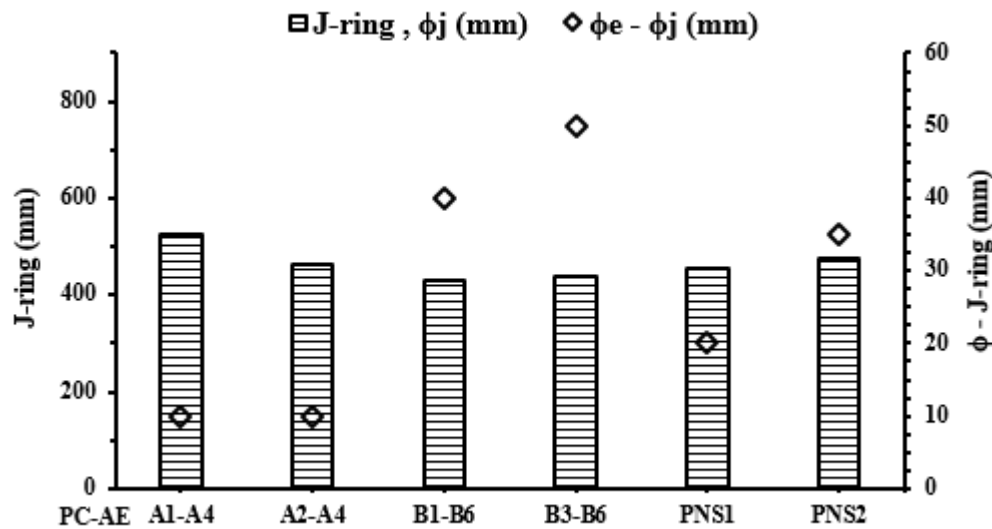


Figure 5.4 : Capacité de passage des BSAP-résidentiels (E/L = 0,55)

5.5.3 L'entonnoir en V (V-funnel) et temps d'écoulement (T40)

Les Figures 5-5 et 5.6 illustrent la variation du V-Funnel et du T40 des BSAP résidentiels. Leclerc [2011] et [Sotomayor Cruz, 2012] recommandent la mesure du temps d'écoulement nécessaire pour atteindre un étalement de 400 mm (t40). Ceci remplace le t50 généralement considéré dans le cas des BAP. Le t40 recommandé pour les BSAP est de 2 à 7 secondes pour avoir des viscosités appropriées et une bonne stabilité [Leclerc, 2011]. Dans cette étude, les

différents BSAP étudiés ont présenté des t_{40} compris entre 1,3 et 3,4 secondes. Pour le BSAP résidentiel confectionné avec un rapport E/L de 0,50, on constate que les combinaisons A2-A4, PNS1 et PNS2 ont présentés des valeurs qui respectent cette recommandation [Leclerc, 2011]. Par contre les BSAP formulés avec les combinaisons A1-A4, B1-B6, et B3-B6 présentent des temps d'écoulement t_{40} inférieurs à 2 sec. Ceci est synonyme d'une faible viscosité et risque d'instabilité. La facilité de passage sans blocage à travers une section mince est évaluée par le temps d'écoulement à travers le V-Funnel. Cet essai nous permet aussi d'apprécier la viscosité du mélange. Pour un BSAP le temps d'écoulement au V-funnel doit être compris entre 4 et 10 secondes [Leclerc, 2011 ; Rouis, 2017]. Les BSAP étudiés, sont dans cette limite, sauf les mélanges contenant le PNS2 et la combinaison A1-A4 (Figure 5.5). Par ailleurs, pour le BSAP résidentiel confectionné avec un rapport E/L de 0,55, les combinaisons B1-B6, B3-B6 et PNS1 présentent des valeurs qui respecte cette recommandation. Par contre, les valeurs des mélanges A1-A4, A2-A4 et PNS2 sont faibles par rapport à ce qui est recommandé, mais sans compromettre la stabilité des mélanges. On constate que le PNS2 et A2-A4 présentent les temps les plus bas. Les BSAP avec les combinaisons PNS1 et B3-B6 ont un temps d'écoulement V-Funnel plus élevé.

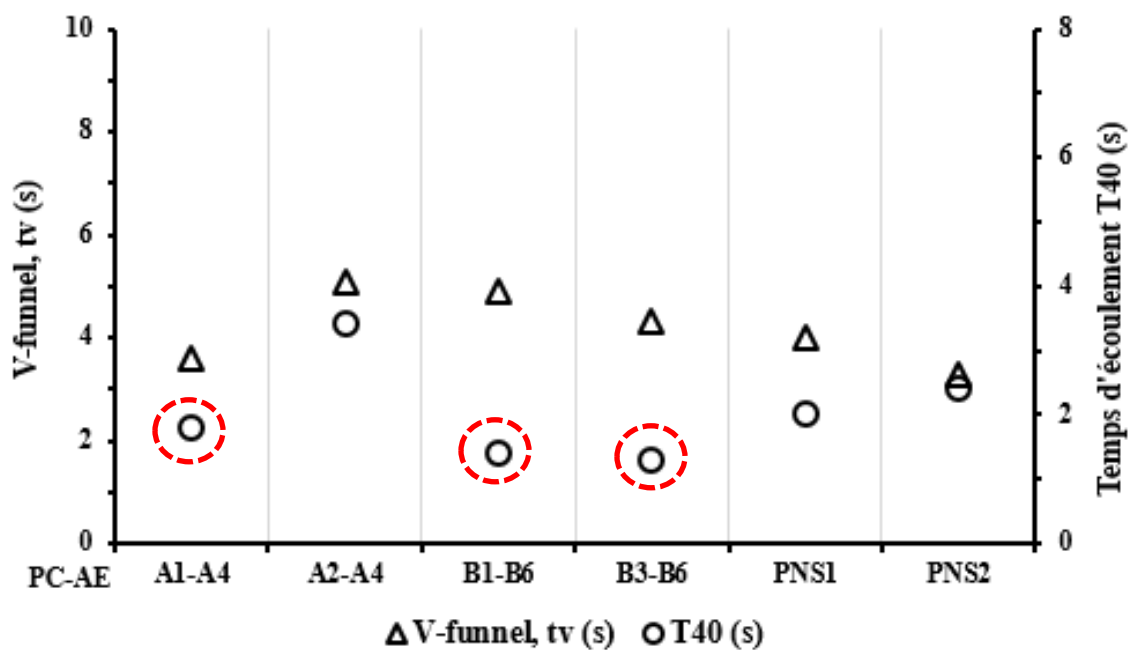


Figure 5.5 : Variation des temps d'écoulement à travers le V-funnel (tv) et T40 des BSAP résidentiels (E/L = 0,50)

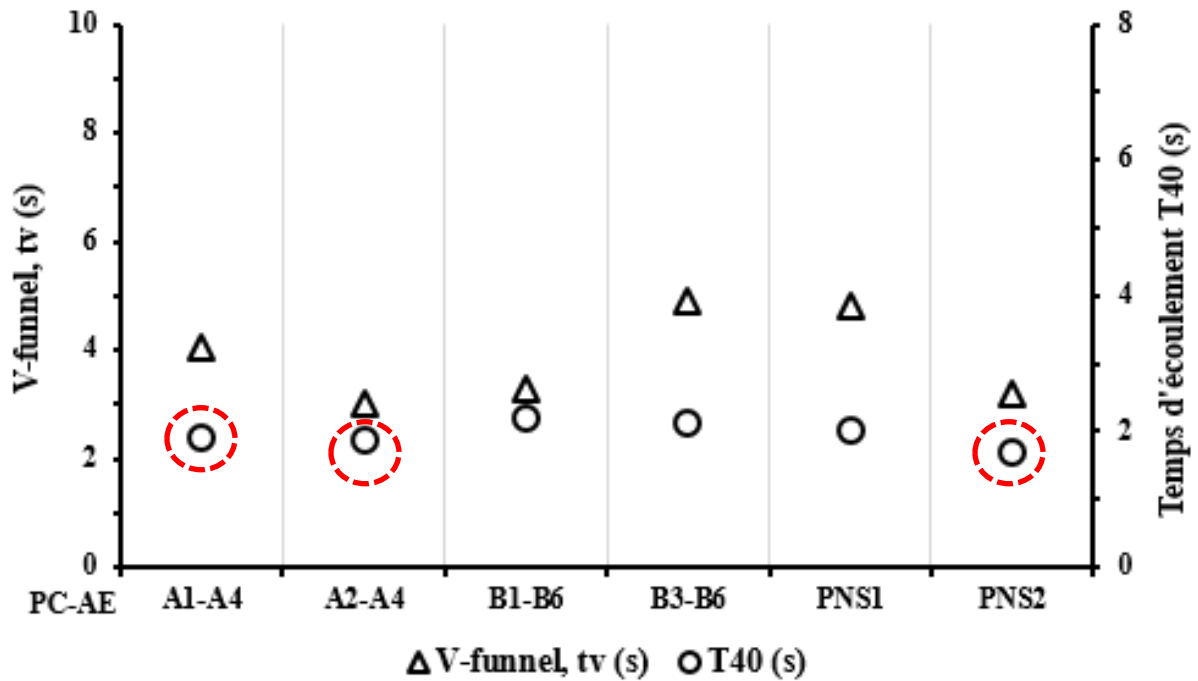


Figure 5.6 : Variation des temps d'écoulement à travers le V-funnel (tv) et T40 des BSAP résidentiels ($E/L = 0,55$)

5.5.4 Capacité de passage dans L-box

Comme pour l'étalement à l'anneau (J-Ring), l'essai de la boîte en L est aussi utilisé pour évaluer l'écoulement restreint et la résistance au blocage des BSAP résidentiels. À cause du caractère semi-fluide des BSAP, le nombre de barres est modifié à 2 barres de diamètre 12 mm (donnant un espacement libre de 59 mm) au lieu de 3 barres préconisées dans le cas des BAP. Dans le cas d'un BSAP, il est préconisé d'appliquer une vibration par le biais d'une aiguille vibrante dans la partie verticale du L-Box. Les vibrations sont appliquées par palier de 5 secondes, jusqu'à l'obtention d'un taux de remplissage de 80% [Leclerc, 2011 ; Sotomayor, 2012]. Les résultats de la figure (5.7) montrent que les BSAP résidentiel proportionné avec le rapport E/L de 0,50 ont tous un rapport ($H2/H1 \leq 0,7$). On peut expliquer cette mauvaise capacité de remplissage par le fait que la vibration appliquée n'était pas suffisante pour atteindre la capacité de remplissage souhaitée. En revanche, pour le BSAP résidentiel proportionné avec le rapport E/L de 0,55 une vibration de 5 à 10 sec a été appliquer à la partie verticale jusqu'à l'obtention d'un taux de remplissage de 80% pour tous les mélange, ce qui a permis d'avoir une bonne capacité de passage comme on peut le voir sur la Figure (5.8).

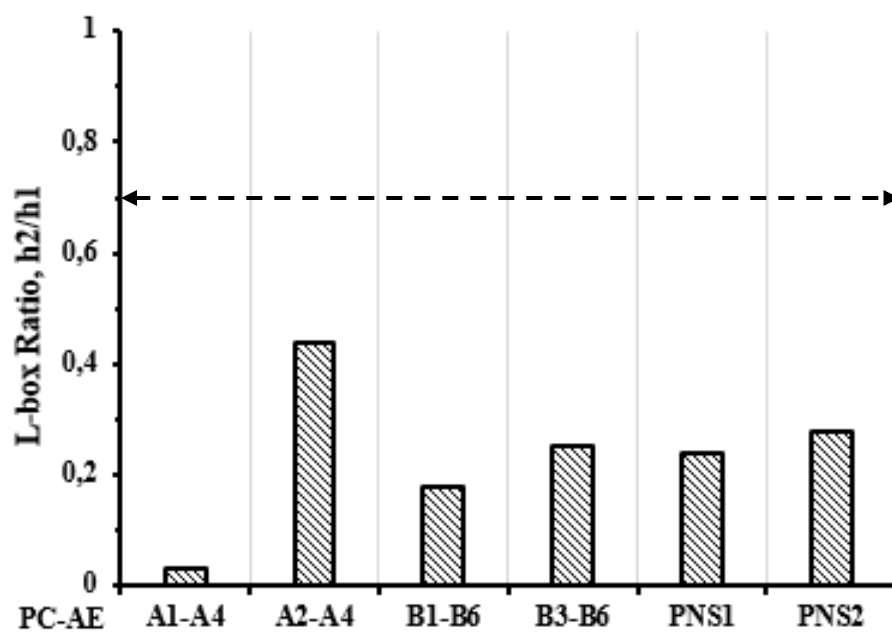


Figure 5.7 : Capacité de passage dans le L-box des BSAP résidentiels ($E/L = 0,50$)

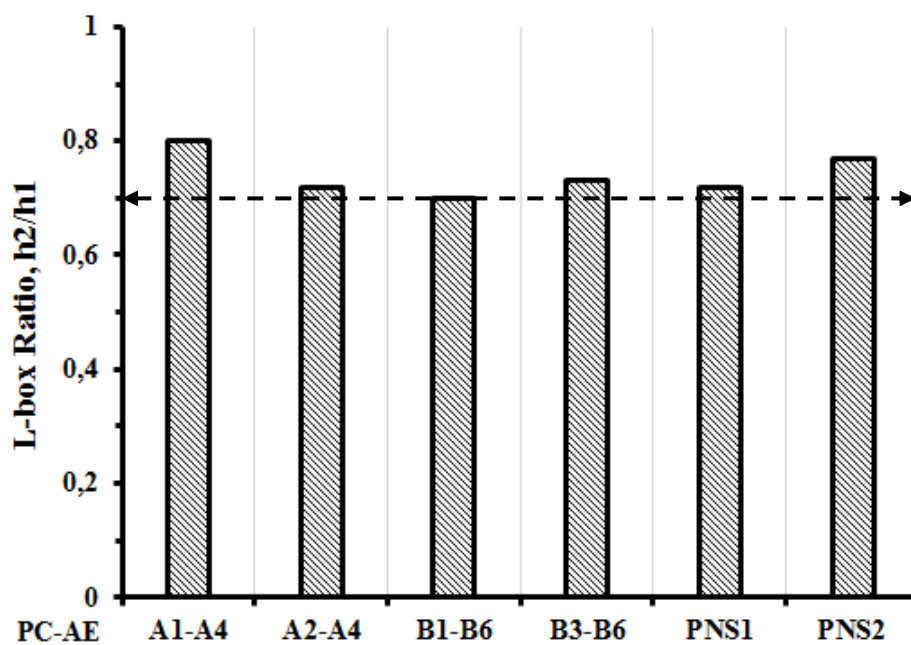


Figure 5.8 : Capacité de passage dans L-box des BSAP résidentiels ($E/L = 0,55$)

5.5.5 Tassements

Les figures 5.9 et 5.10 représentent les tassements des BSAP confectionnés avec les rapports E/L de 0,5 et 0,55 et différentes combinaisons SP-AEA. On constate que tous les BSAP ont un tassement total inférieur à la limite de 0,5 % [ACI 237]. Cette bonne stabilité est due au caractère semi-auto plaçant, mais également à la présence de la fumée de silice dans le ciment ternaire utilisés car la fumée de silice améliore la stabilité.

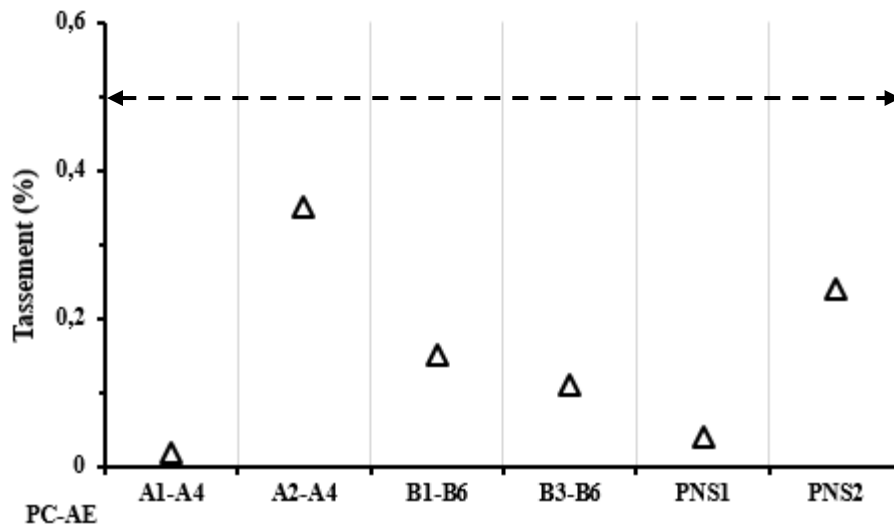


Figure 5.9 : Tassements total des BSAP résidentiels (E/L = 0,50)

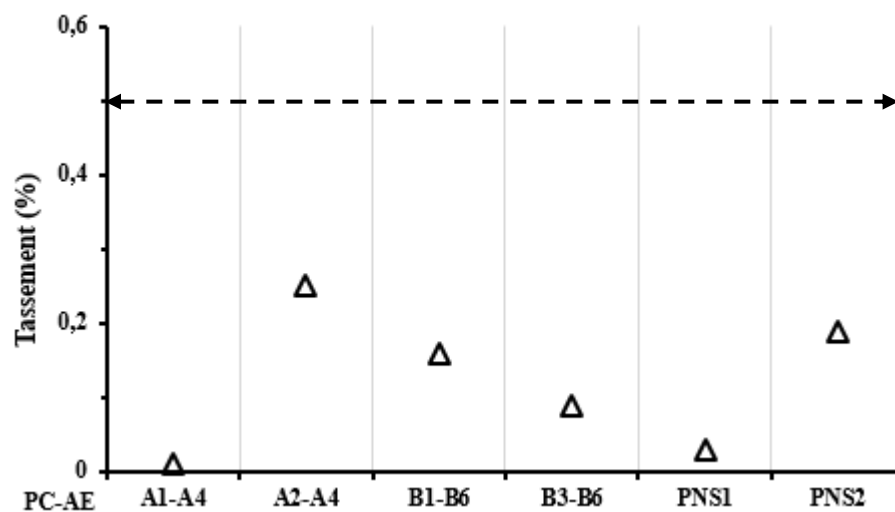


Figure 5.10 : Tassements total des BSAP résidentiels (E/L = 0,55)

5.5.6 Viscosité plastique et seuil de cisaillement

Les Figures 5-11 et 5-12 représentent les paramètres rhéologiques des BSAP étudiés. D'après Khayat et Sotomayer Cruz, les bétons sont considérés comme autoplaçant lorsque leur seuil de cisaillement se situe entre 50 ~ 200 Pa et leur viscosité plastique entre 20 ~ 100 Pa. s [Sotomayer Cruz, 2012]. Dans notre étude, les BSAP proportionnés avec le rapport E/L de 0,50 ont un seuil de cisaillement compris entre 46 et 97 Pa et une faible viscosité plastique comprise entre 6 et 17 Pa. s. Cependant, le BSAP proportionné avec le rapport E/L de 0,55 ont un seuil de cisaillement moyen compris entre 46 et 98 Pa et une faible viscosité plastique comprise entre 5 et 16 Pa. s. Dans le cas des BSAP proportionné avec un rapport E/L de 0,50, on constate que le mélange préparé avec la combinaison B3-B6 affiche un seuil de cisaillement élevé et une viscosité moyenne. Par contre, le mélange préparé avec la combinaison A2-A4 a donné le plus faible seuil de cisaillement et une très forte viscosité plastique, alors que l'utilisation du PNS2 résulte en un seuil et une viscosité plastique plus faible. Le même constat a été fait pour le BSAP proportionné avec le rapport E/L de 0,55.

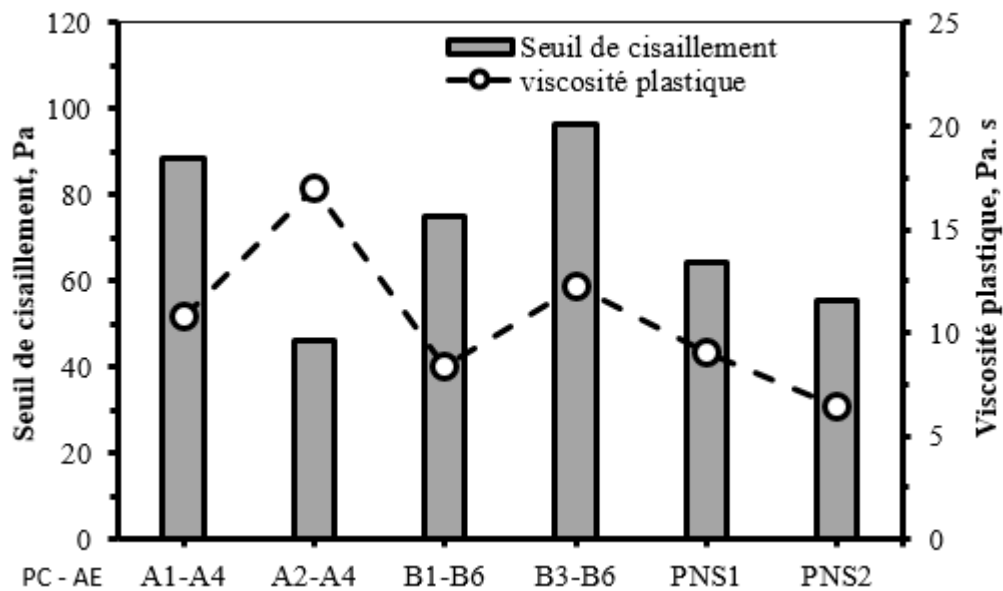


Figure 5.11 : Viscosité plastique et seuil de cisaillement des BSAP-résidentiels (E/L = 0,50)

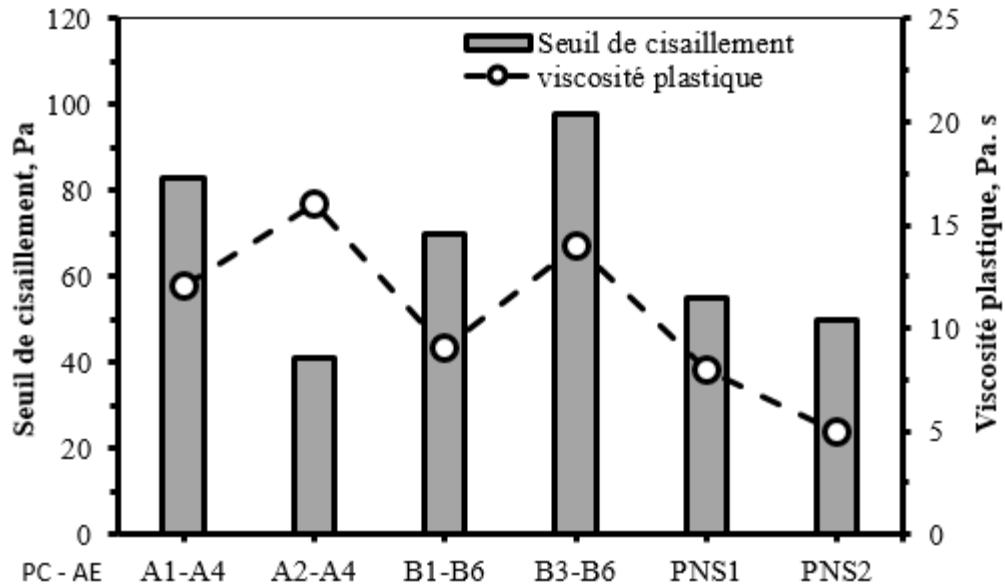


Figure 5.12 : Viscosité plastique et seuil de cisaillement des BSAP-résidentiels ($E/L = 0,55$)

5.5.7 Résistance à la compression

Les résistances à la compression des BSAP résidentiels proportionnés avec les rapports E/L de 0,50 et 0,55 obtenus après 1, 3, 7, 28 et 56 jours sont respectivement illustrées sur les figures 5.13 et 5.14. Les valeurs obtenues représentent la moyenne obtenue sur trois cylindres testés pour chaque béton et à chaque échéance. On constate une nette évolution des résistances pour tous les mélanges et tous les BSAP proportionnés. Les BSAP formulés avec un rapport E/L de 0,50 ont atteint des résistances comparables d'environ 39 à 47 MPa à 28 jours de mûrissement. Par ailleurs, les BSAP proportionnés avec le rapport E/L de 0,55 ont atteint de résistance d'environ 29 à 37 MPa à 28 jours de mûrissement. Ces résistances sont nettement supérieures à la valeur visée pour le BSAP résidentiel de 25 MPa à 28 jours. Les combinaisons B1-B6 et B3-B6 ont résulté en des résistances à 1 jour relativement supérieur aux autres combinaisons. Par contre, cet écart entre les différentes combinaisons est moins important après un âge de 28 jours. Dans le cas de BSAP proportionnés avec un rapport E/L de 0,50, une résistance comparable à un 1 jour pour toutes les combinaisons, mais à 3 jours les combinaisons A1-A4, A2-A4 et B1-B6 montrent des résistances relativement plus élevées. L'utilisation du PNS2 résulte en des résistances relativement plus faibles, notamment après 7 jours d'âge.

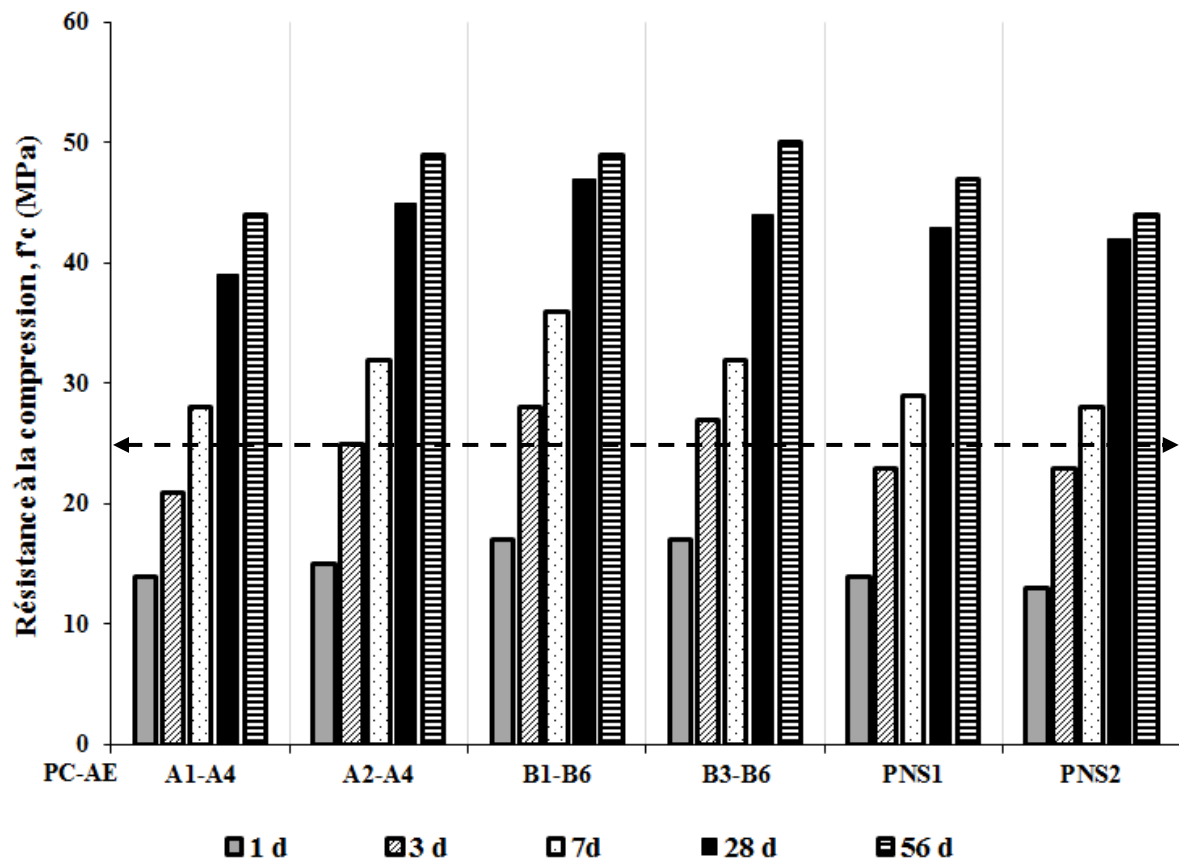


Figure 5.13 : Résistance à la compression des BSAP résidentiels ($E/L = 0,50$)

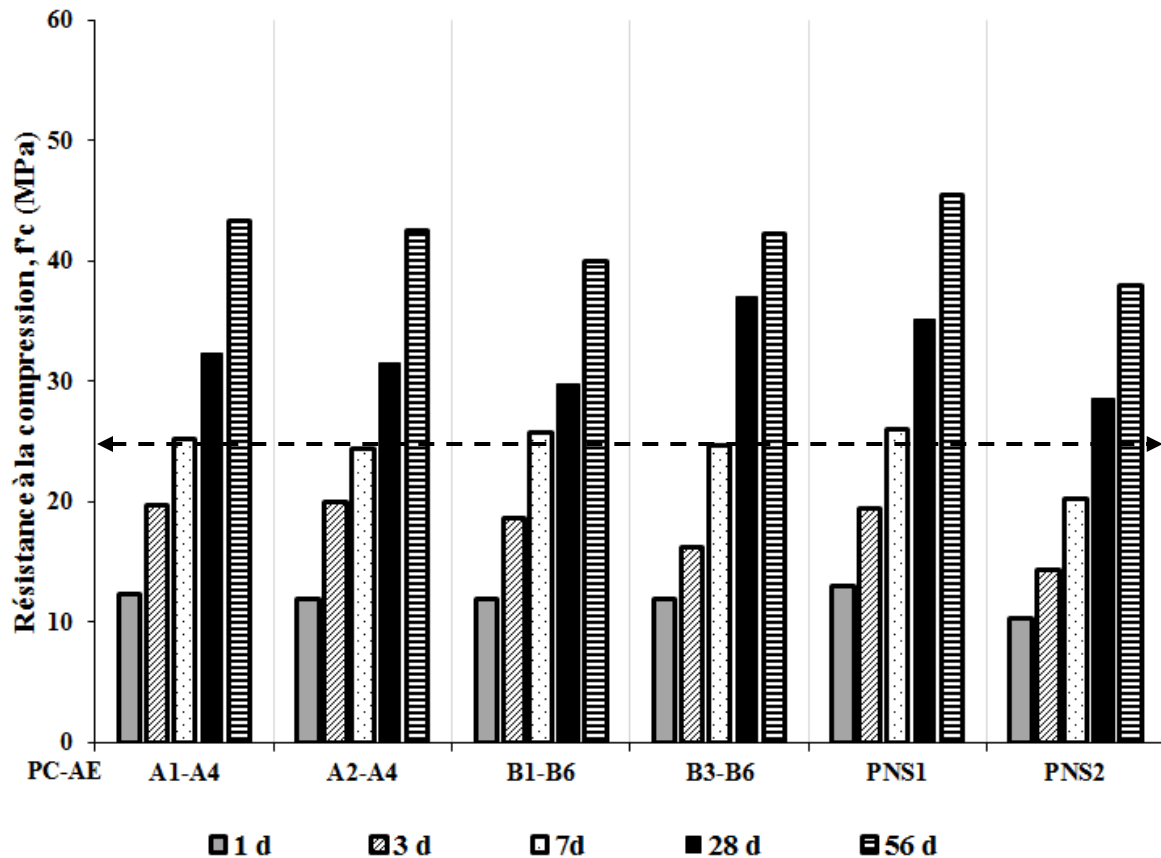


Figure 5.14 : Résistance à la compression des BSAP-résidentiels ($E/L = 0,55$) à 1, 3, 7, 28 et 56 jours

5.6 Béton semi-autoplaçant pour l'infrastructure

5.6.1 Étalements

Les Figures 5.15 et 5.16 illustrent l'étalement des BSAP infrastructure à 10, 15, 30 et à 45 minutes après le premier contact entre l'eau et le ciment. On constate que tous les bétons ont plus ou moins atteint l'étalement visé de 500 ± 30 mm. Tous les mélanges BSAP sont stables (Tableaux 5.5 et 5.6).

Pour le BSAP destiné pour l'infrastructure proportionné avec un rapport E/L de 0,38, volume de pâte de 34% et une teneur en liant de 475 Kg/m^3 , on observe que les mélanges ont des

étalements se trouvent plus ou moins dans l'intervalle des valeurs visées (500 ± 30 mm) indépendamment du type et de la teneur en SP. Par ailleurs, la rétention d'étalement est faible avec les systèmes A1-A4 et B2-B6. Par contre le mélange avec la combinaison A2-A4, C2-B6 et PNS2 ont une meilleure rétention de la fluidité. Ceci peut s'expliquer par une meilleure compatibilité de ces systèmes avec liant ternaire utilisé, la présence de la fumée de silice et du cendre volante a accentué l'effet bénéfique du PNS2 et maintien la fluidité dans le temps.

Dans le cas des BSAP confectionnés avec un rapport E/L de 0,40 et teneur en liant de 420 kg/m^3 , la perte de l'étalement dans le temps est plus grande dans le mélange avec la combinaison A1-A4 (plus faible rétention). Cependant, le mélange avec la combinaison C2-B6 a pratiquement gardé la même fluidité, une perte très minime a été enregistré après 45 min. Ceci peut s'expliquer par une meilleure compatibilité de la combinaison avec le liant utilisé.

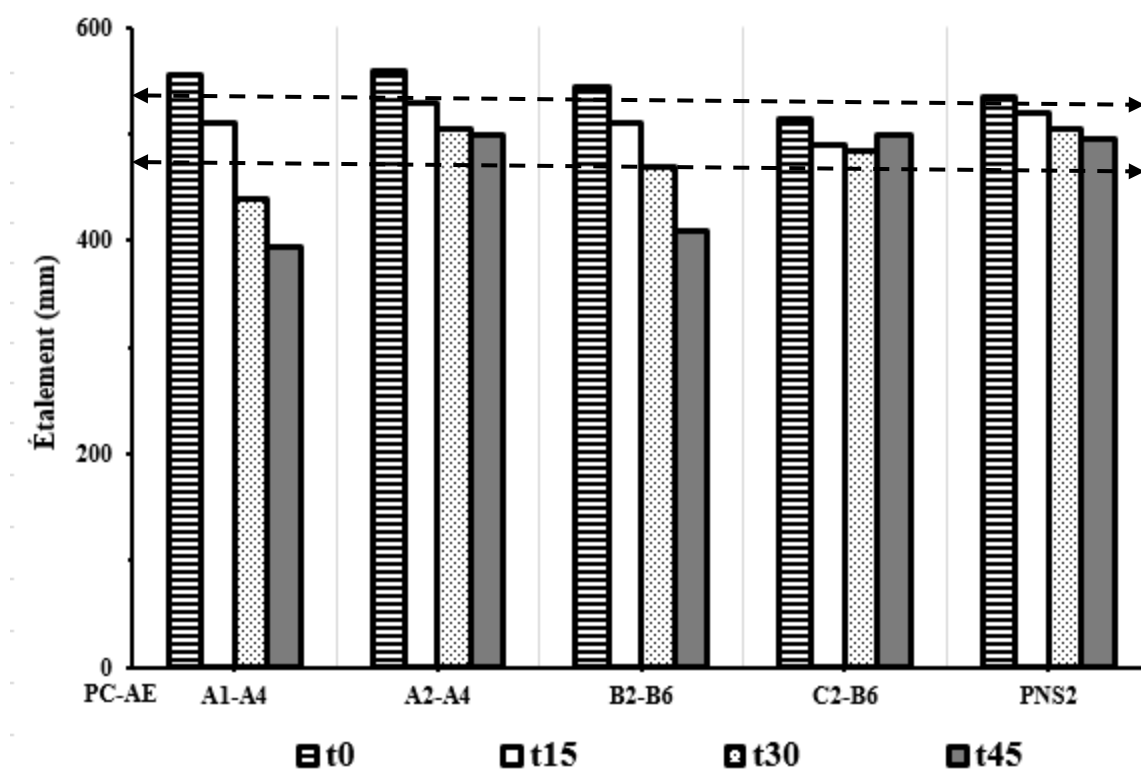


Figure 5.15 : Étalement des BSAP destinés pour l'infrastructure (E/L = 0,38)

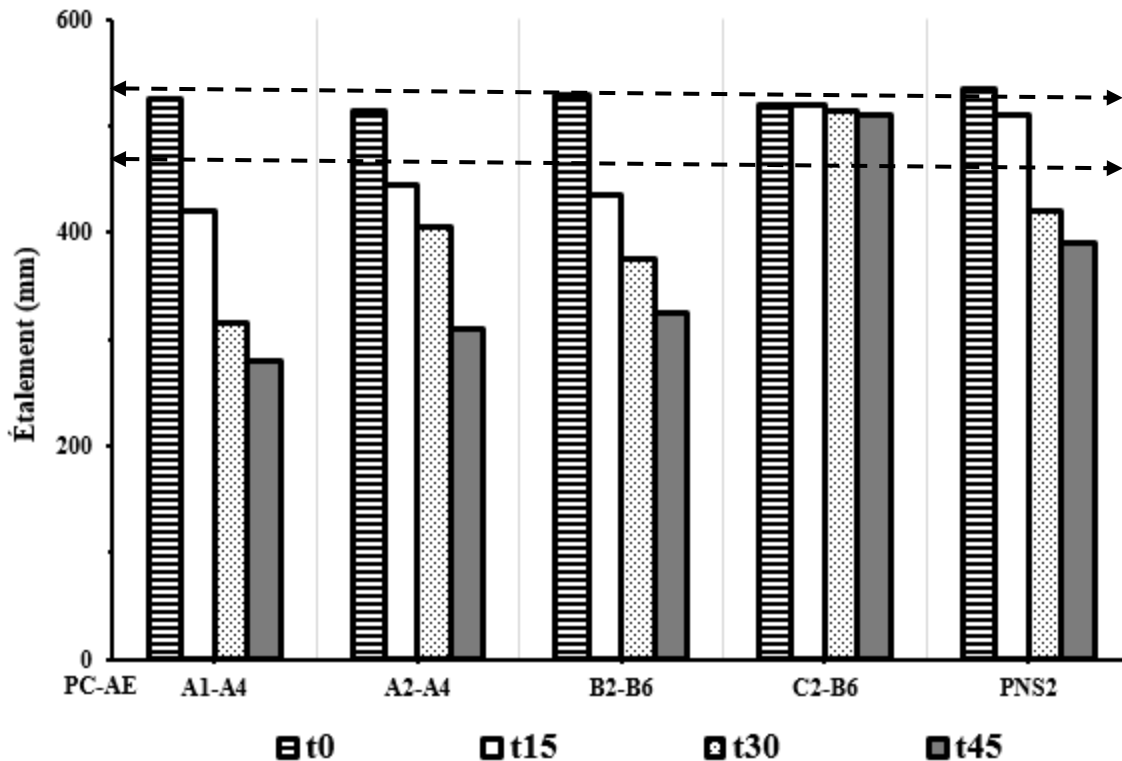


Figure 5.16 : Étalement des BSAP destinés pour l'infrastructure (E/L = 0,40)

5.6.2 Étalement à l'anneau (J-ring)

La norme ASTM C 1621 indique que si la différence entre la mesure de l'étalement et celle du J-ring ($E - J$) est inférieure à 50 mm, alors le béton a une bonne aptitude au passage. Les résultats présentés dans les Figures 5.17 et 5.18, montrent que tous les BSAP destinés pour l'infrastructure ont une bonne capacité de passage. Cette bonne aptitude de passage est probablement liée au caractère semi-auto plaçant, car le blocage survient si le béton est trop fluide et instable (ségrégation dynamique) ou trop plastique. Ceci se traduit par le fait que le BSAP est un béton pas trop fluide et pas trop sec c'est un béton qui se trouve à la frontière entre un béton conventionnel et un BAP ceci explique sa bonne capacité de passage à travers des obstacles.

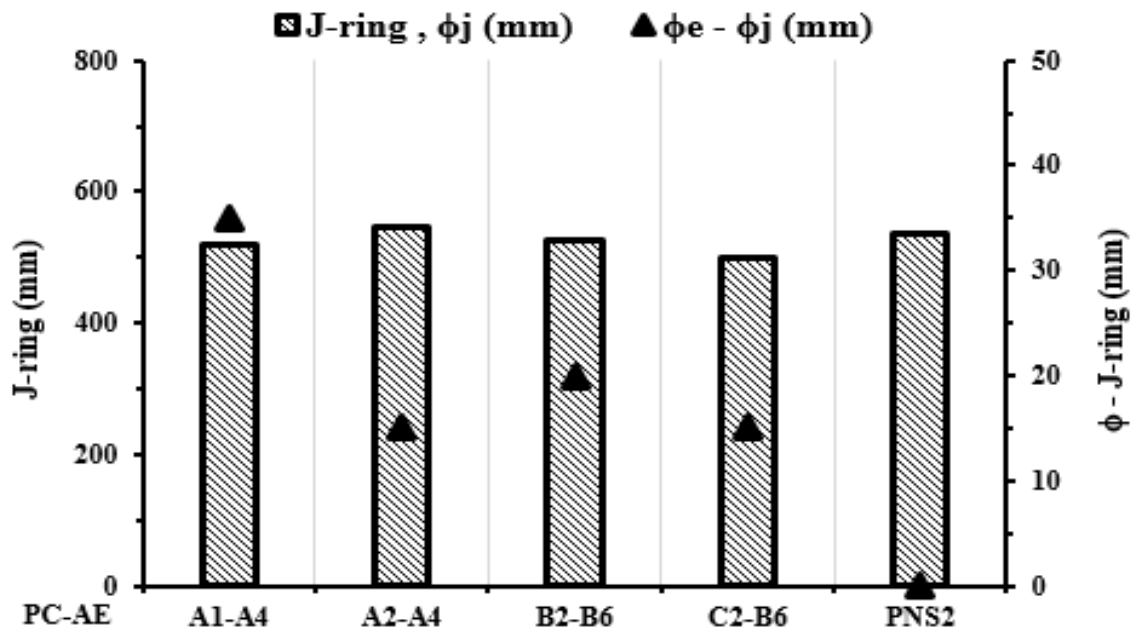


Figure 5.17 : Capacité de passage des BSAP destinés pour l'infrastructure (E/L = 0,38)

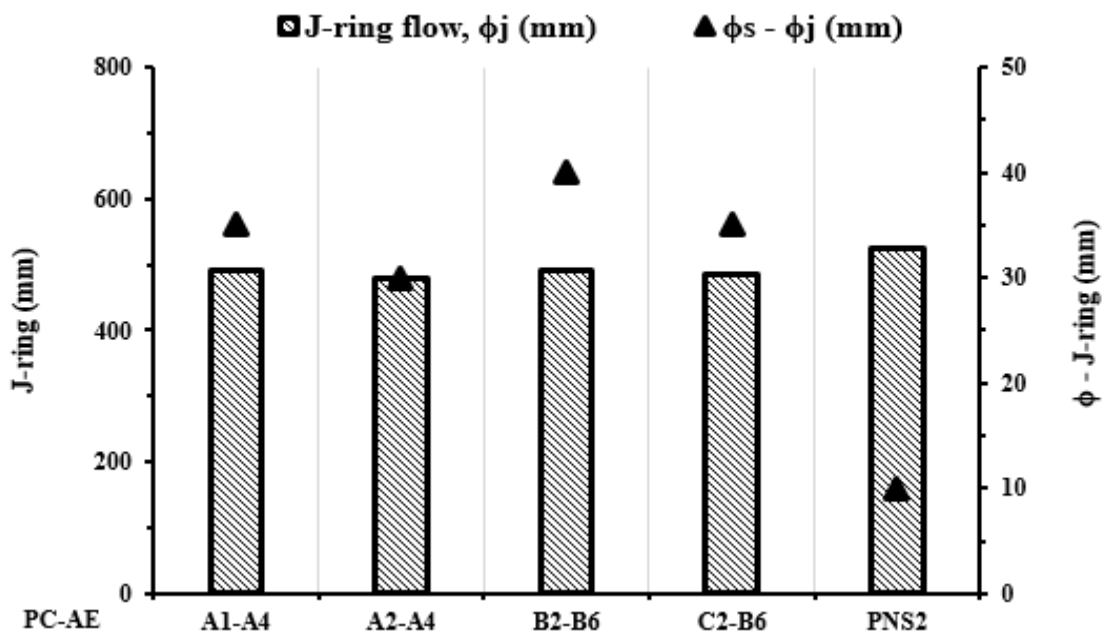


Figure 5.18 : Capacité de passage des BSAP pour l'infrastructure (E/L = 0,40)

5.6.3 Entonnoir en V (V-funnel) et le temps d'écoulement (T40)

Les Figures 5.19 et 5.20 illustrent la variation du V-Funnel et du T40 des BSAP pour l'infrastructure. [Leclerc, 2010] et [Sotomayor Cruz, 2012] recommandent la mesure du temps

nécessaire pour atteindre un étalement de 400 mm (T40). Ceci remplace le T50 généralement considéré dans le cas des BAP. Le T40 recommandé pour les BSAP est de 2 à 7 secondes pour avoir des viscosités appropriées et une bonne stabilité [Leclerc, 2011]. Dans cette étude, les différents BSAP étudiés destinés pour l'infrastructure ont présenté des T40 compris entre 1,8 et 3 secondes. Pour le BSAP destiné pour l'infrastructure proportionnée avec un rapport E/L de 0,38, on constate que tous les mélanges ont présentés des valeurs qui respectent cette recommandation, sauf la valeur du mélange avec la combinaison B2-B6 qui est faible par rapport à ce qui est recommandé, mais sans compromettre la stabilité des mélanges. La facilité de passage sans blocage à travers une section mince est évaluée par le temps d'écoulement à travers le V-Funnel. Cet essai nous permet aussi d'apprécier la viscosité du mélange. Pour un BSAP pour l'infrastructure, le V-funnel doit être compris entre 4 et 10 secondes. Les BSAP étudiés, sont dans cette limite, sauf le mélange contenant le C2-B6 a donné un temps d'écoulement plus élevé. Le BSAP formulé avec la combinaison PNS2 présente les temps les plus faibles. Par ailleurs, pour le BSAP destiné pour l'infrastructure proportionnée avec un rapport E/L de 0,40, tous les mélanges présentent des valeurs qui respectent cette recommandation. La facilité de passage sans blocage à travers une section mince est évaluée par le temps d'écoulement à travers le V-Funnel. On constate que les BSAP présentent un temps d'écoulement moyen.

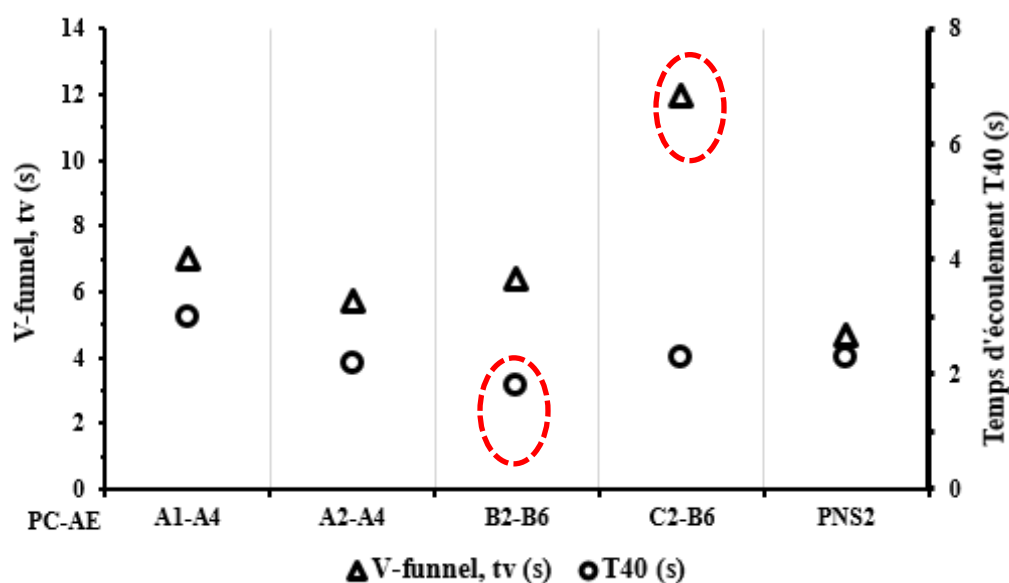


Figure 5.19 : Variation des temps d'écoulement a travers le V-funnel (tv) et T40 des BSAP destinés pour l'infrastructure (E/L = 0,38)

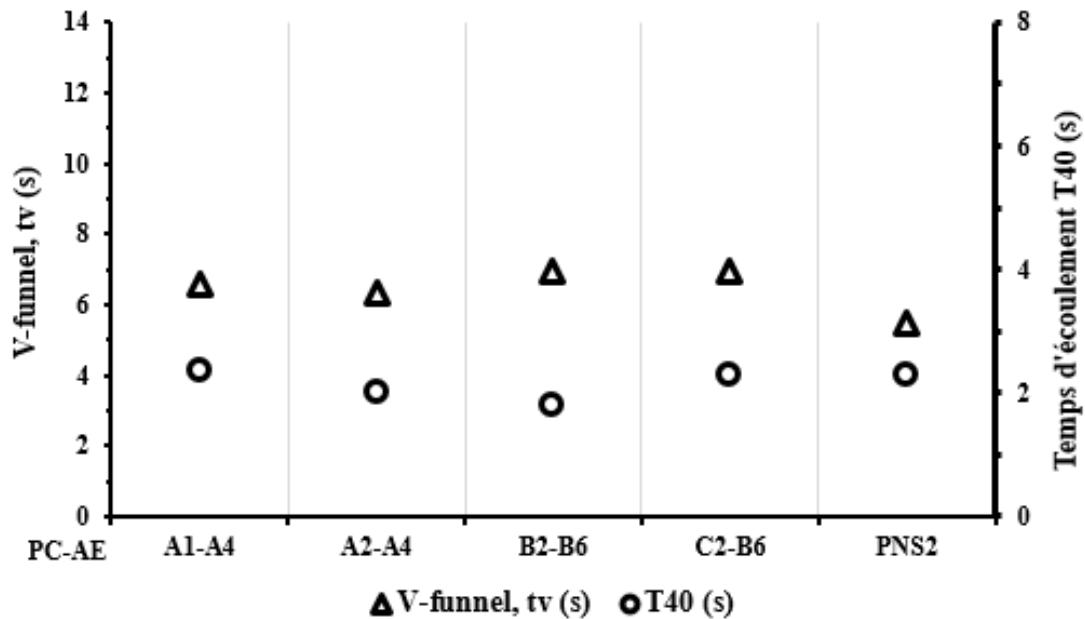


Figure 5.20 : Variation des temps d'écoulement tv et T40 de BSAP destinés pour l'infrastructure ($E/L = 0,40$)

5.6.4 Capacité de passage dans le L-box

Comme pour l'étalement à l'anneau (J-Ring), l'essai de la boîte en L est aussi utilisé pour évaluer l'écoulement restreint et la résistance au blocage des BSAP pour l'infrastructure. À cause du caractère semi-fluide des BSAP, le nombre de barres est modifié à 2 barres de diamètre 12 mm (donnant un espacement libre de 59 mm) au lieu de 3 barres préconisées dans le cas des BAP. Dans le cas d'un BSAP, il est préconisé aussi d'appliquer une vibration par le biais d'une aiguille vibrante dans la partie verticale du L-Box. Les vibrations sont appliquées par palier de 5 secondes, jusqu'à l'obtention d'un taux de remplissage de 80% [Leclerc, 2011]. Les résultats de la figure (5.21) montrent que les BSAP pour l'infrastructure proportionné avec le rapport E/L de 0,38, les combinaisons A1-A4, A2-A4 et PNS2 ont un rapport ($H2/H1 \geq 0,7$) donc les trois mélanges ont une bonne capacité de remplissage par contre les mélanges avec la combinaison B2-B6, C2-B6 ont un rapport ($H2/H1 \leq 0,7$) donc un taux remplissage inférieur à 80%. On peut expliquer cette mauvaise capacité de remplissage par le fait que la vibration appliquer n'était pas suffisante ou la formulation n'était pas assez fluide pour atteindre la capacité de remplissage souhaitée. Par ailleurs, pour le BSAP proportionner avec le rapport

E/L de 0,40 (figure 5.22) tous les mélanges ont une bonne capacité de remplissage, sauf le mélange avec la combinaison A2-A4 n'a pas atteint la capacité de remplissage souhaitée.

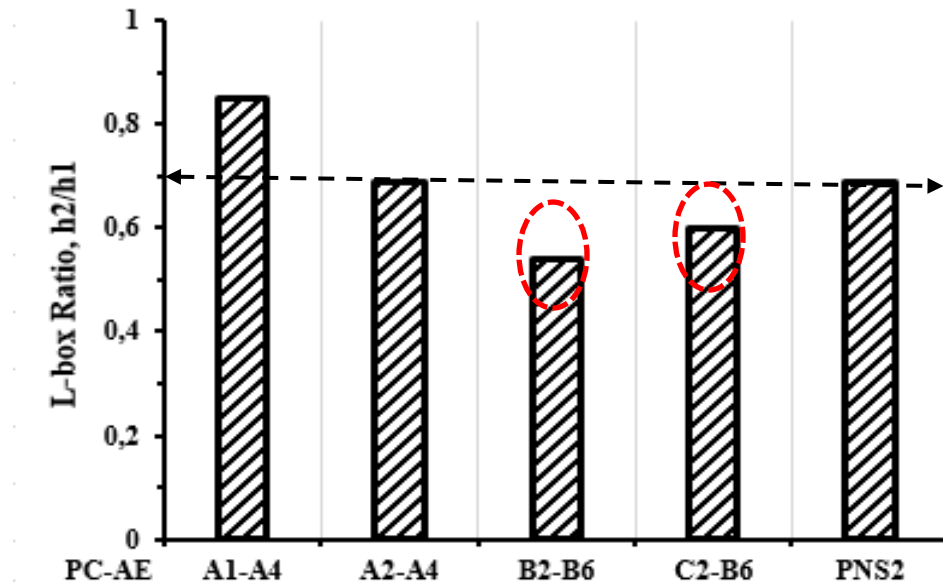


Figure 5.21 : Capacité de passage dans L-box des BSAP pour l'infrastructure (E/L = 0,38)

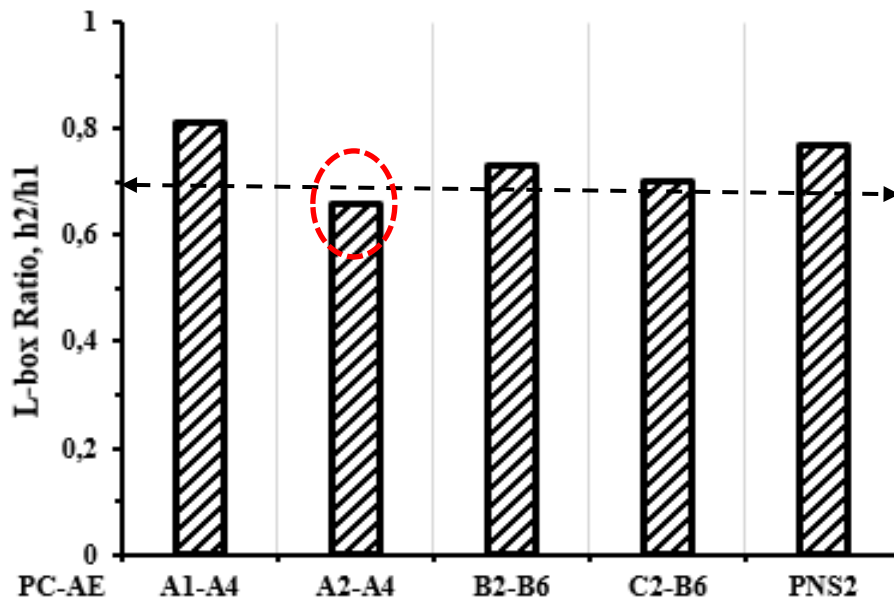


Figure 5.22 : Capacité de passage dans L-box des BSAP pour l'infrastructure (E/L = 0,40)

5.6.5 Tassements

Les Figures 5.23 et 5.24 représentent les tassements des BSAP pour l'infrastructure proportionnés avec les rapports E/L de 0,38 et 0,40 et différentes combinaisons SP/AE. On constate que tous les BSAP pour l'infrastructure proportionnée avec le rapport E/L de 0,40 ont un tassement total inférieur à la limite de 0,5 %. Donc tous les mélanges ont une très bonne stabilité. Cette bonne stabilité est due au caractère semi auto plaçant, mais également à la présence de la fumée de silice dans le liant utilisé, car la fumée de silice améliore la stabilité. Par ailleurs, les BSAP proportionnés avec le rapport E/L de 0,38 quatre de cinq mélanges sont très stables, sauf le mélange formulé avec la combinaison PNS2 à un tassement total limite.

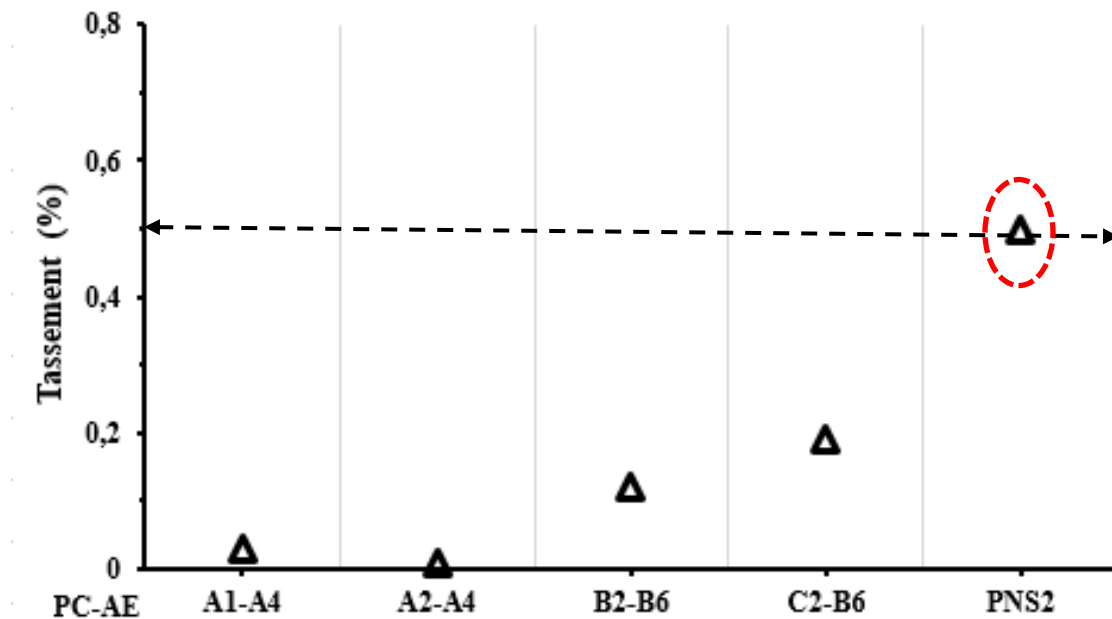


Figure 5.23 : Tassements total des BSAP pour l'infrastructure (E/L = 0,38)

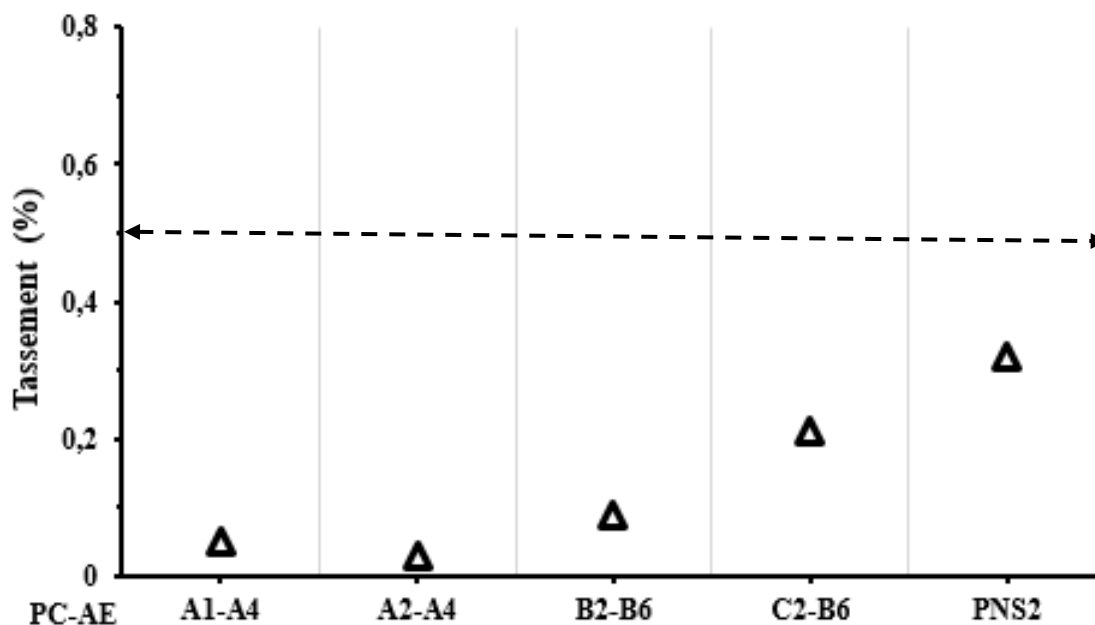


Figure 5.24 : Tassements total des BSAP pour l'infrastructure ($E/L = 0,40$)

5.6.6 Viscosité plastique et seuil de cisaillement

Les Figures 5-25 et 5-26 représentent les paramètres rhéologiques des BSAP étudiés. D'après Khayat et Sotomayer Cruz, les bétons sont considérés comme autoplaçants lorsque leur seuil de cisaillement se situe entre 50 et 200 Pa et leur viscosité plastique entre 20 ~ 100 Pa. s [Sotomayor Cruz, 2012]. Dans notre étude, les BSAP destinés pour l'infrastructure proportionnés avec le rapport E/L de 0,38 a un seuil de cisaillement compris entre 38 ~ 94 Pa et une viscosité plastique moyenne comprise entre 21 et 35 Pa.s. Cependant, le BSAP destiné pour l'infrastructure proportionnée avec le rapport E/L de 0,40, a un seuil de cisaillement compris entre 36 et 83 Pa et une faible viscosité plastique comprise entre 19 et 32 Pa.s. Dans le cas des BSAP destinés pour l'infrastructure proportionné avec un rapport E/L de 0,38, on constate que le mélange préparé avec la combinaison A1-A4 affiche un seuil de cisaillement et une viscosité plastique élevé (Figure 5.25). En revanche, le mélange préparé avec la combinaison PNS2 a donné un seuil de cisaillement et une faible viscosité plastique plus faible. Par ailleurs, le même constat a été fait avec le BSAP proportionné avec le rapport E/L de 0,40 (figure 5.26), la combinaison A1-A4 affiche un fort seuil de cisaillement, alors que la combinaison C2-B6 affiche la plus grande viscosité plastique.

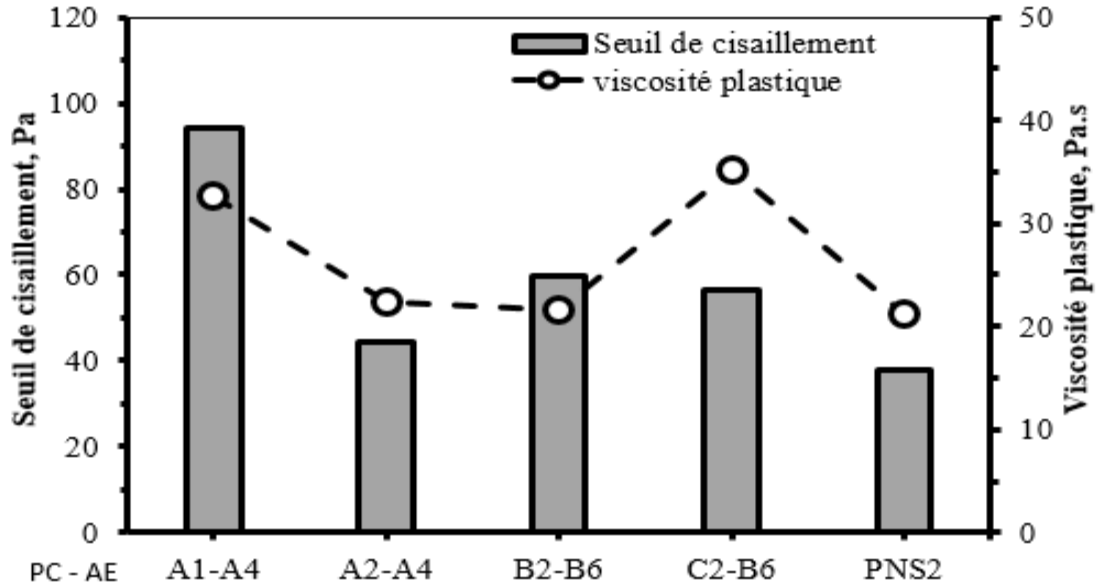


Figure 5.25 : Viscosité plastique et seuil de cisaillement des BSAP pour l'infrastructure ($E/L = 0,38$)

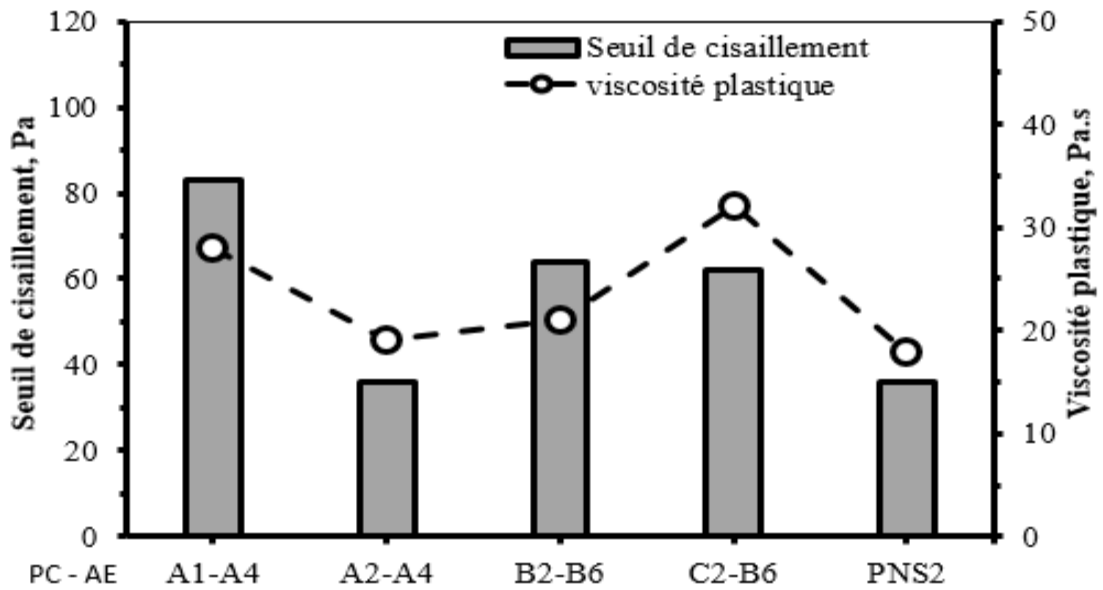


Figure 5.26 : Viscosité plastique et seuil de cisaillement des BSAP destiné pour l'infrastructure ($E/L = 0,40$)

5.6.7 Résistance à la compression

Les résistances à la compression des BSAP destinés pour l'infrastructure proportionnés avec les rapports E/L de 0,38 et 0,40 obtenus après 1, 3, 7, 28 et 56 jours sont respectivement illustrés sur les figures 5.27 et 5.28. Les valeurs obtenues représentent la moyenne obtenue sur

trois cylindres testés pour chaque béton et à chaque échéance. On constate une nette évolution des résistances pour tous les BSAP proportionnés. Les BSAP proportionnés avec le rapport E/L de 0,38 ont atteint des résistances comparables d'environ 56 à 63 MPa à 28 jours de mûrissement par contre les bétons semi auto plaçant pour l'infrastructure proportionnés avec le rapport E/L de 0,40 on atteint de résistance d'environ 46 à 52 MPa à 28 jours de mûrissement or ces résistances sont nettement supérieures à la valeur visée de 35 MPa à 28 jours de murissement. Cependant, pour toutes les combinaisons une résistance comparable a été obtenu à jeune âge, par contre à long terme (56 jours) pour le BSAP confectionné avec le rapport E/L de 0,38, la plus forte résistance a été obtenu avec la combinaison C2-B6 et B2-B6. Cette hausse de résistance semble être liée au liant ternaire utilisés et à l'adjuvant utilisé.

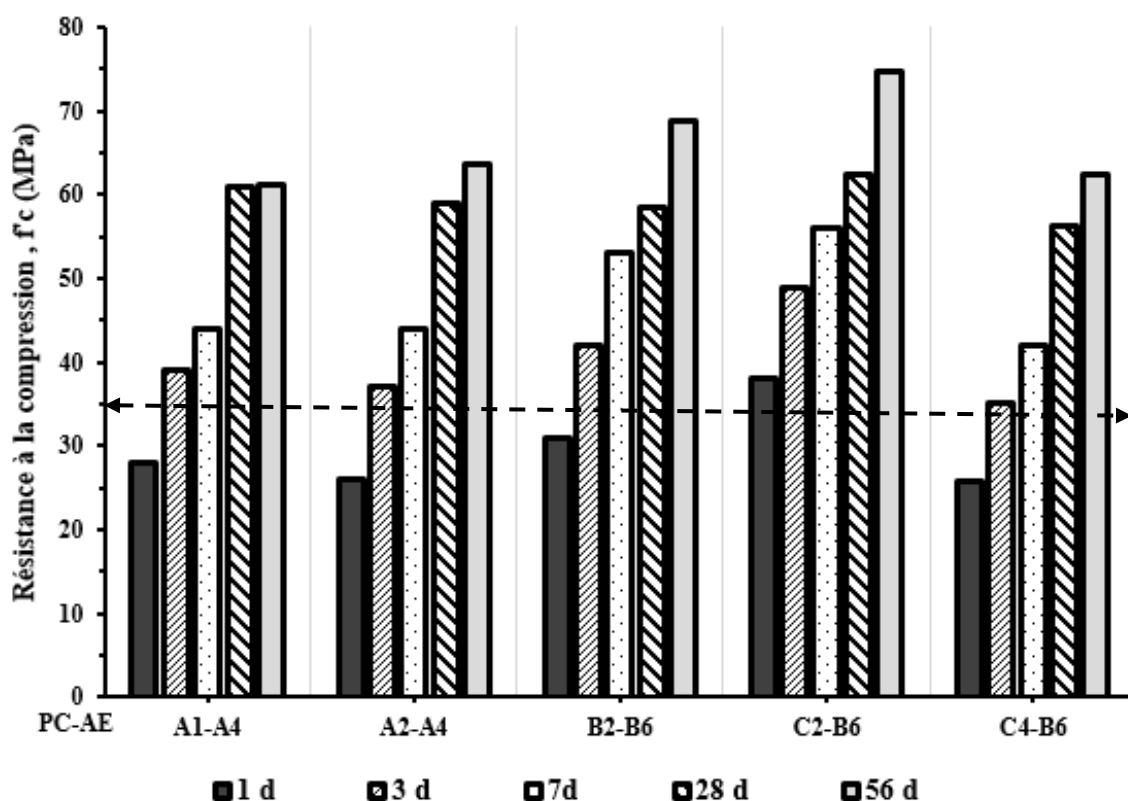


Figure 5.27 : Résistance à la compression des BSAP pour l'infrastructure (E/L = 0,38)

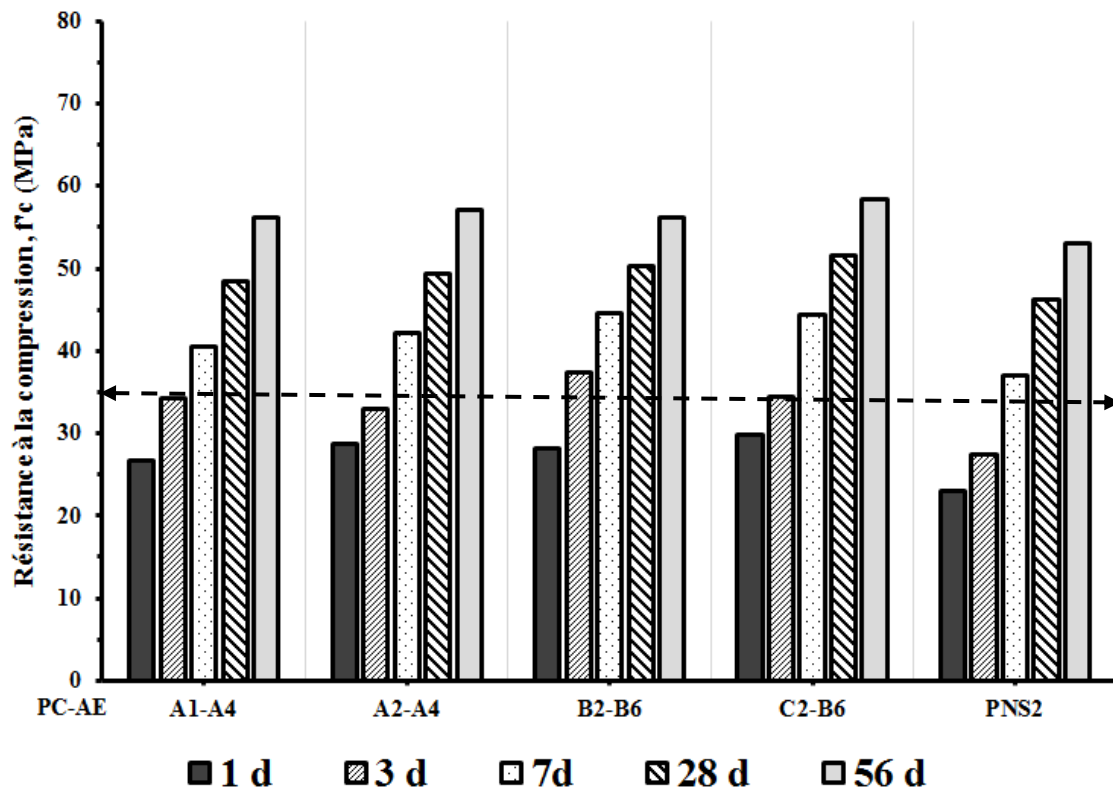


Figure 5.28 : Résistance à la compression des BSAP pour l'infrastructure ($E/L = 0,40$)

5.7 Conclusions

Les résultats obtenus permettent de dresser les observations suivantes :

Pour chaque classe de BFRA, les combinaisons SP/AE optimums sont identifiées.

L'efficacité des systèmes PC/AE/AV ou PNS/AE/AV est fonction du type et des dosages utilisés. Elle est également fonction du type de BFRA, notamment le rapport Eau/Liant (E/L).

Les dosages du couple SP/AE nécessaires pour atteindre la fluidité et la teneur en air visées selon le type de BFRA sont déterminés.

En tenant compte de la fluidité initiale, de son maintien dans le temps et la teneur en air visée, un classement des différentes combinaisons SP-AEA est établi.

1) Fluidité initiale et teneur en air

Dans le cas de la fluidité initiale et de la teneur en air, le classement se présente comme suit :

BSAP résidentiel (E/L= 0,50, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 360 kg/m³)

PC-A2 (0,37%) > PC-A1 (0,44%) > PC-B3 (0,52 %) > PC-B1 (0,67 %) > PNS1 (0,95 %) > PNS2 (1,02 %).

BSAP résidentiel (E/L= 0,55, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 340 kg/m³)

PC-A2 (0,37%) > PC-A1 (0,44%) > PC-B3 (0,52 %) > PC-B1 (0,67 %) > PNS1 (0,95 %) > PNS2 (1,02 %).

BSAP pour les infrastructures (E/L= 0,38, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 475 kg/m³, un volume de pâte de 34%).

PC-A2 (0, 38%) > PC-B2 (0, 33%) > PC-A1 (0, 49%) > PC-C2 (0, 74%) > PNS2 (1, 07%).

BSAP pour les infrastructures (E/L= 0,40, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 420 kg/m³, un volume de pâte de 31%).

PC-B2 (0, 37%) > PC-A2 (0, 35 %) > PC-A1 (0, 47%) > PC-C2 (0, 6%) > PNS2 (1, 13%).

2) Maintien de la fluidité

La rétention de la fluidité dans le temps peut varier significativement d'une combinaison (SP/AE) à l'autre. L'efficacité des différentes combinaisons étudiées en termes du maintien de la fluidité est donnée ci-dessous (efficacité décroissante) :

BSAP résidentiel (E/L= 0,50, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 360 kg/m³)

PNS2 (1,02%) > PC-B1 (0,67%) > PC-A2 (0,37%) > PNS1 (0,95 %) > PC-B3 (0,52) > PC-A1 (0,44 %).

BSAP résidentiel (E/L= 0,55, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 340 kg/m³)

PC-A2 (0,23 %) ≈ PNS2 > PC-B1 (0,49%) > PC-A1 (0,35%) > PC-B3 (0,44 %) > PNS1 (0,88).

BSAP pour les infrastructures (E/L= 0,38, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 475 kg/m³, un volume de pâte de 34%)

PC-C2 (0, 74 %) > PNS2 (1, 07 %) > PC-A2 (0, 38 %) > PC-B2 (0, 33 %) > PC-A1 (0, 49 %).

BSAP pour les infrastructures (E/L= 0,40, S/G = 0,55 et une teneur en liant de 420 kg/m³, un volume de pâte de 31%)

PC-C2 (0, 60 %) > PNS2 (1,13) > PC-B2 (0, 37 %) \approx PC-A2 (0, 35 %) > PC-A1 (0, 47 %).

Chapitre 6 : Effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des BFRA

6.1 Introduction

Pour chaque classe de BFRA, la formulation du MBE correspondant est identifiée et utilisée pour évaluer l'influence des caractéristiques des liants et liants alternatifs étudiés (Phase 1) sur la rhéologie et son évolution dans le temps, les propriétés au jeune âge, la demande en adjuvant, les propriétés mécaniques, et la durabilité de différents types de BFRA. Les essais expérimentaux de la Phase 3 de ce projet sont réalisés sur ces MBE.

6.2 Types des MBE

Les mortiers de béton équivalents (MBE) correspondant aux types de BFRA étudiés sont :

- Les mortiers de béton équivalent pour la construction résidentielle (MBE-RES).
- Les mortiers de béton équivalent pour les infrastructures (MBE-I).

6.3 Formulation des MBE correspondant

Les MBE semi-autoplaçant résidentiels sont formulés uniquement à partir des BSAP résidentielles proportionnés avec un rapport E/L de 0,55. Par ailleurs, les MBE semi-autoplaçant pour l'infrastructure sont formulé uniquement à partir des BSAP proportionnés avec un rapport E/L de 0,40.

Les formulations des MBE correspondant au BSAP résidentiel sont présentées dans les tableaux 6.1 et 6.2. Par ailleurs, les formulations optimisées de MBE correspondant au BSAP infrastructure sont présentées dans les tableaux 6.3 et 6.4.

Tableau 6.1 : Formulations optimisées de MBE résidentiel (E/L = 0,50)

	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Eau (kg/m³)	180					
Liant (kg/m³)	360					
E/L	0,50					
Sable (kg/m³)	996					
SP (mL/100 kg de liant)	440	370	670	520	950	1020
AEA (mL/100 kg de liant)	3	7	6	0	8	40
AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0	0

Tableau 6.2 : Formulations optimisées de MBE résidentiel (E/L = 0,55)

	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B1 AE-B6	PC-B3 AE-B6	PNS1 AE-B6	PNS2 AE-B6
Eau (kg/m³)	187					
Liant (kg/ m³)	340					
E/L	0,55					
Sable (kg/ m³)	994					
SP (mL/100 kg de liant)	354	236	494	441	882	941
AEA (mL/100 kg de liant)	4	7	6	3	27	44
AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0	0

Tableau 6.3 : Formulations optimisées de MBE-BSAP- infrastructure (E/L = 0,38)

	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Eau(kg/m³)	180				
Liant (kg/m³)	475				
E/L	0,38				
Sable (kg/m³)	918				
SP (mL/100 kg de liant)	496	380	338	749	1076
AEA (mL/100 kg de liant)	13	14	3	1	32
AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0

Tableau 6.4 : Formulations optimisées de MBE-BSAP- infrastructure (E/L = 0,40)

	PC-A1 AE-A4	PC-A2 AE-A4	PC-B2 AE-B6	PC-C2 AE-B6	PNS2 AE-B6
Eau (kg/m³)	168				
Liant (kg/m³)	420				
E/L	0,4				
Sable (kg/m³)	965				
SP (mL/100 kg de liant)	472	358	375	607	1130
AEA (mL/100 kg de liant)	10	8	4	5	43
AV (mL/100 L d'eau)	0	0	0	0	0

6.4 Présentation des résultats sur les MBE

Les propriétés des formulations des MBE-SAP optimisées pour les applications résidentielles sont respectivement présentées dans les Tableaux 6.5, 6.6, 6.7 et 6.8 alors que les propriétés mécaniques sont respectivement présentées dans les tableaux 6.9, 6.10, 6.11 et 6.12. Par ailleurs, les propriétés des formulations des MBE-SAP optimisées pour les infrastructures sont respectivement présentées dans les Tableaux 6.13, 6.14, 6.15 et 6.16, alors que les propriétés mécaniques sont respectivement présentées dans les tableaux 6.17, 6.18, 6.19 et 6.20.

Tableau 6.5 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-BSAP résidentiels de référence

MBE- résidentiel (E/L = 0,55)		PC-AE A1-A4	PC-AE A2-A4	PC-AE B1-B6	PC-AE PNS2-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		205	200	190	215
T40 (s)		1,25	1,03	1,4	1,1
Étalement (mm)	15 min	196	192	187	208
	40 min	190	181	181	202
	45 min	184	170	178	193
Temps d'écoulement (s)		2,6	2,0	8,0	1,7
Seuil d'écoulement (Pa)		-	163,2	187,6	57,5
Viscosité plastique (Pa.S)		-	1,9	2,1	1,5

Tableau 6.6 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-BSAP résidentiels simulé
(70% GU + 25% CV + 5% FS)

MBE-BSAP de référence simulé pour les applications résidentiels (E/L = 0,55)		A2-A4	B1-B6	PNS2-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		203	192	216
T40 (s)		1,03	1,5	1,1
Étalement (mm)	40 min	177	183	200
	70 min	160	170	181
Temps d'écoulement (s)		2,02	7,50	2,00
Seuil d'écoulement (Pa)		168,6	191,7	58,5
Viscosité plastique (Pa.S)		1,9	0,9	2,3

Tableau 6.7 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-BSAP résidentiels formulés
avec un liant binaire (GU + CV)

MBE-BSAP résidentiels binaire (GU+CV) (E/L = 0,55)		PC-AE A2-A4			PC-AE B1-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		20	25	30	20	25	30	20	25	30
Étalement initial, ϕ (mm)		197	200	205	184	197	198	200	204	197
T40 (s)		2,5	3,0	2,8	2,9	1,8	1,6	2,6	1,0	2,6
Étalement (mm)	40 min	183	187	192	173	178	191	192	196	187
	70 min	174	176	180	160	162	184	180	183	171
Temps d'écoulement (s)		7,9	6,3	2,8	8,9	7,6	7	3,4	1	2,5
Seuil d'écoulement (Pa)		196	221	121	201	187	187	276	57	165
Viscosité plastique (Pa.S)		1,8	2,2	1,7	2	8,8	2,2	3,8	0,5	2,3

Tableau 6.8 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-BSAP résidentiels formulés
avec le liant binaire (GU + PV)

MBE-BSAP résidentiels binaire (GU+PV) (E/L = 0,55)		PC-AE A2-A4			PC AE B1-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		15	20	25	15	20	25	15	20	25
Étalement initial, ϕ (mm)		140	145	188	180	175	180	198	201	203
T40 (s)		3,3	3,0	2,0	3,2	2,0	2	2,9	2,8	2,4
Étalement (mm)	40 min	131	137	180	173	166	175	190	194	193
	70 min	125	129	171	167	157	168	183	181	184
Temps d'écoulement (s)		0	0	4,7	8,9	7,7	7,2	1,3	2	2
Seuil d'écoulement (Pa)		338	187	167	204	263	265	102	76	70
Viscosité plastique (Pa.S)		2,4	2,7	1,4	3,0	3,3	2,3	3,8	2,3	2,1

Tableau 6.9 : Résistances à la compression des MBE-BSAP résidentiels de référence

MBE-BSAP résidentiels (E/L = 0,55)		PC-AE A1-A4	PC-AE A2-A4	PC-AE B1-B6	PC-AE PNS2-B6
Résistance à la compression (MPa)	1 j	7,3 (0,3)	10,4 (0,3)	14,4 (0,5)	10,6 (0,4)
	3 j	12 (0,9)	16,8 (0,6)	22,2 (0,8)	21,2 (0,7)

() : écart type

Tableau 6.10 : Résistances à la compression des MBE-BSAP résidentiels simulé
(70% GU + 25% CV + 5% FS)

MBE-BSAP résidentiels de référence simulé (E/L = 0,55)		PC-AE A2-A4	PC-AE B1-B6	PC-AE PNS2-B6
Résistance à la compression (MPa)	1 j	11,7 (0,7)	15,5 (0,2)	10,2 (0,9)
	3 j	18,8 (0,4)	22,7 (1,1)	20,7 (0,6)

Tableau 6.11 : Résistances à la compression des MBE-BSAP résidentiels formulés avec le liant binaire (GU + CV)

MBE-BSAP résidentiels binaire (GU+ CV) (E/L = 0,55)		PC-AE A2-A4			PC-AE B1-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		20	25	30	20	25	30	20	25	30
Résistance à la compression (MPa)	1 j	9,1 (1,2)	8,9 (0,6)	8 (0,8)	11,6 (0,3)	10,1 (0,7)	9,7 (0,6)	9,5 (0,9)	9,1 (1,1)	8,6 (0,7)
	3 j	14,8 (0,6)	14 (0,3)	13,7 (0,9)	18,2 (0,7)	17,6 (1,3)	17 (0,5)	17,2 (0,8)	16,8 (0,4)	16 (0,5)

Tableau 6.12 : Résistances à la compression des MBE-BSAP résidentiels formulés avec le liant binaire (GU + PV)

MBE-BSAP résidentiels binaire (GU+ PV) (E/L = 0,55)		PC-AE A2-A4			PC-AE B1-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		15	20	25	15	20	25	15	20	25
Résistance à la compression (MPa)	1 j	6,1 (0,4)	6 (0,8)	5,8 (0,9)	8,6 (0,4)	8,4 (0,7)	8 (1,4)	5,8 (0,3)	5,6 (1,4)	5,3 (0,8)
	3 j	12,9 (1,3)	12,7 (1,1)	11,9 (0,7)	13,4 (0,9)	13,3 (1,2)	12,8 (0,7)	12,8 (0,4)	12,3 (1,1)	11,6 (0,6)

Tableau 6.13 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-BSAP infrastructure de référence

MBE-BSAP- infrastructurel (E/L = 0,4)		PC-AE A2-A4	PC-AE B2-B6	PC-AE C2-B6	PC-AE PNS2-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		195	210	201	216
T40 (s)		1,32	1,77	1,33	2,03
Étalement (mm)	15 min	190	205	197	210
	40 min	183	200	193	201
	45 min	172	194	189	194
Temps d'écoulement (s)		7	6,28	7,2	2
Seuil d'écoulement (Pa)		187,6	83,2	119,6	61,94
Viscosité plastique (Pa.S)		14,5	3,4	4,8	1,34

Tableau 6.14 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-SAP infrastructure simulé
(70% GU + 25% CV + 5% FS)

MBE-BSAP- infrastructurel référence simulé (E/L = 0,4)		PC-AE A2-A4	PC-AE B2-B6	PC-AE C2-B6	PC-AE PNS2-B6
Étalement initial, ϕ (mm)		197	213	202	217
T40 (s)		1,32	1,7	1,33	2,5
Étalement (mm)	40 min	177	199	193	198
	70 min	166	188	184	188
Temps d'écoulement (s)		7,5	6,01	7,6	2
Seuil d'écoulement (Pa)		122	119,2	4,7	59,5
Viscosité plastique (Pa.S)		5,1	89,8	2,8	1,28

Tableau 6.15 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-BSAP pour les infrastructures
liants binaire GU + CV

MBE-BSAP infrastructure binaire (GU+CV) (E/L = 0,4)		PC-AE C2-B6			PC-AE B2-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		20	25	30	20	25	30	20	25	30
Étalement initial, ϕ (mm)		176	172	181	177	205	209	189	216	218
T40 (s)		3,3	2	1,8	3,6	2,0	1,6	3,0	1,1	1,1
Étalement (mm)	40 min	167	164	170	169	194	198	169	206	208
	70 min	157	156	161	158	182	189	160	198	200
Temps d'écoulement (s)		Blocage	Blocage	5,6	Blocage	4,0	3,9	Blocage	2,1	1,9
Seuil d'écoulement (Pa)		135	127	106	257	120	97	367	104	97
Viscosité plastique (Pa.S)		3,6	3,6	3,8	6,9	3,5	1,34	5,4	2,5	2,1

Tableau 6.16 : Propriétés des formulations optimisées des MBE-BSAP pour les infrastructures
liantes binaire GU + PV

MBE-BSAP infrastructure binaire (GU+PV) (E/L = 0,4)		PC-AE C2-B6			PC-AE B2-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		15	20	25	15	20	25	15	20	25
Étalement initial, ϕ (mm)		178	185	189	150	158	165	200	208	210
T40 (s)		3,1	1,9	1,8	3,0	2,1	2,0	3,1	3,0	2,9
Étalement (mm)	40 min	167	176	183	141	143	155	191	198	201
	70 min	157	156	174	133	136	150	178	190	192
Temps d'écoulement (s)		BLC	9,25	9,1	BLC	BLC	BLC	BLC	BLC	BLC
Seuil d'écoulement (Pa)		598	378	322	541	297	297	66	76	54
Viscosité plastique (Pa.S)		12,6	12,7	6,3	5,6	5,9	6,8	11,2	2,3	5,3

BLC : Blocage

Tableau 6.17 : Résistances à la compression des MBE-BSAP de référence pour les
infrastructures

MBE-BSAP- infrastructurel référence (E/L = 0,4)		PC-AE A2-A4	PC-AE B2-B6	PC-AE C2-B6	PC-AE PNS2-B6
Résistance à la compression (MPa)	1 j	25,7 (0,3)	25,1 (0,9)	23,9 (0,3)	21,1 (0,9)
	3 j	30,8 (1,2)	29,6 (1,5)	28,2 (0,6)	26,7 (0,7)

() : écart type

Tableau 6.18 : Résistances à la compression des MBE-BSAP de référence simulée pour les
infrastructures

MBE-BSAP pour les infrastructures simulé (E/L = 0,40)		PC-AE A2-A4	PC-AE B2-B6	PC-AE C2-B6	PC-AE PNS2-B6
Résistance à la compression (MPa)	1 j	24,7 (0,6)	23,3 (1,1)	21,8 (0,4)	20,6 (0,5)
	3 j	29,4 (0,4)	28,7 (0,8)	27,6 (0,7)	25,1 (0,8)

() : écart type

Tableau 6.19 : Résistances à la compression des MBE-BSAP pour les infrastructures liantes
binaire GU + CV

MBE-BSAP pour les infrastructures liants binaire GU + CV (E/L=0,4)		PC-AE C2-B6			PC-AE B2-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		20	25	30	20	25	30	20	25	30
Résistance à la compression (MPa)	1 j	14,3 (0,3)	13,8 (0,6)	12,5 (1,2)	15,5 (0,6)	13,7 (1,1)	13 (0,7)	12,4 (0,3)	11,7 (1,2)	11 (1,1)
	3 j	18,6 (1,1)	17,9 (0,8)	17,04 (0,5)	21,6 (0,3)	20,1 (0,4)	19,6 (0,5)	17,1 (0,5)	16,8 (0,8)	16,2 (0,9)

() : écart type

Tableau 6.20 : Résistances à la compression des MBE-SAP pour les infrastructures liant
binaire GU + PV

MBE-SAP- infrastructure Binaire (GU + PV) (E/L=0.4)		PC-AE C2-B6			PC-AE B2-B6			PC-AE PNS2-B6		
Taux de remplacement (%)		15	20	25	15	20	25	15	20	25
Résistance en compression, f_c (Mpa)	1 j	11,5 (0,6)	11 (0,9)	10,6 (0,6)	13,9 (0,3)	13,1 (0,7)	11,4 (0,6)	11 (0,4)	10,6 (0,5)	9,7 (0,7)
	3 j	16,4 (1,3)	15,5 (0,7)	14,7 (1,1)	18,8 (0,5)	16,9 (1,2)	16,2 (1,1)	15,6 (1,3)	14 (1,2)	13,5 (1,3)

() : écart type

1. MBE-SAP résidentiels

6.4.1 Mini étalement

La fluidité des MBE-SAP résidentiel contenant 15, 20 et 25% de poudre de verre et 20, 25 et 30% de cendres volantes est évaluée en déterminant l'étalement au mini-cône. Selon la combinaison SP-AE utilisé, le diamètre moyen de l'étalement des MBE-SAP résidentiel binaires sont présentés dans la Figure 6.1. Les résultats montrent que la fluidité des MBE-SAP dépend de type de superplastifiant mais aussi de la teneur en ajout minéral. Les résultats des mélanges contenant la poudre de verre (15% à 25%) en présence de la combinaison PC-A2-A4, montrent une faible fluidité comparée aux mélanges de référence et aux mélanges contenant les combinaisons PC-B1-B6 et PNS2-B6. Par contre, l'utilisation de 25% de poudre de verre résulte en une fluidité similaire à celle du mélange témoins avec tous les adjuvants testés. Cependant, les résultats des mélanges contenant la cendre volante (20% à 30%) en présence de la combinaison A2-A4, B1-B6 et PNS2-B6 montrent que le remplacement du ciment par la CV-F affecte peu la fluidité, une fluidité similaire a été enregistrée pour toutes les combinaisons testées. On constate également que le mélange contenant les cendres volantes à des taux de remplacement de 25% à 30% en présence de la combinaison B1-B6 a engendré une fluidité légèrement supérieure à celle du mélange de référence. Ceci traduit la bonne compatibilité de la combinaison B1-B6 avec les cendres volantes utilisées, mais aussi l'effet bénéfique de la forme sphérique des particules des cendres volantes sur la fluidité.

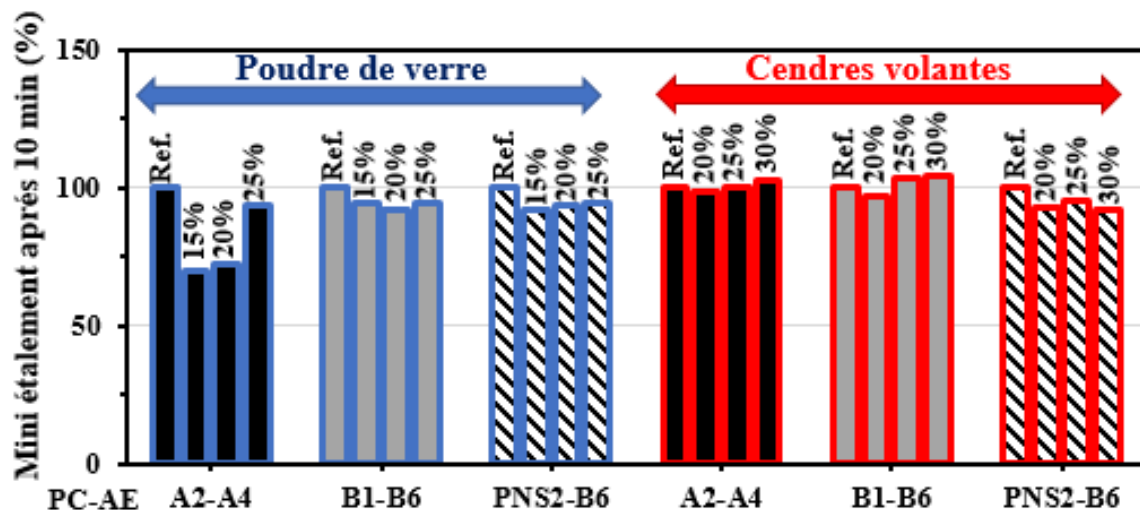


Figure 6.1 : Mini-étalement après 10 min des MBE Résidentiels

6.4.2 Rétention de la fluidité

La rétention de la fluidité est un critère très important lors de la mise en place. La perte de fluidité dans le temps, soit la perte d'étalement, est présentée sur la Figure 6.2. Tous les types de PC et PNS employés démontrent une perte de fluidité dans le temps. Cependant, le mortier binaire résidentiel incorporant la poudre de verre contenant la combinaison A1-A4 perd plus l'étalement (efficacité faible sur la rétention). Par contre, l'utilisation de la combinaison PNS2-B6 et B1-B6 a permis d'avoir une meilleure rétention de la fluidité, pour le taux de remplacement utilisés (15 à 25%), alors que les mortiers binaire résidentiel incorporant la cendre volante-F contenant le B1-B6 a permis d'avoir une meilleure rétention de la fluidité que celui contenant PNS2-B6 et A2-A4 surtout pour un taux de remplacement de 20% et 25%. L'utilisation des cendres volantes (jusqu'à 20% de remplacement) en combinaison avec B1-B6 présente un gain de fluidité.

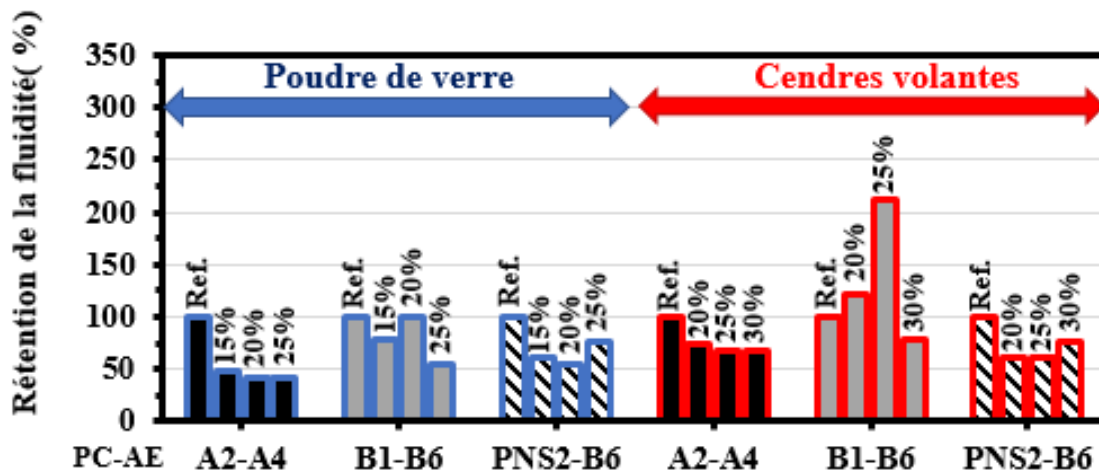


Figure 6.2 : Rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE résidentiels

6.4.3 T40 du MBE

La Figure 6.3 illustre le temps d'écoulement (T40) des MBE résidentiels. Le temps d'écoulement (T40) recommandé pour les MBE est de 2 à 7 secondes pour avoir des viscosités appropriées et une bonne stabilité [Leclerc, 2011]. Dans cette étude, les différents MBE résidentiels incorporant la poudre de verre ont présenté des temps d'écoulement (T40) compris entre 2 et 3,3 secondes, alors que le MBE résidentiel incorporant les cendres volantes ont présenté des temps d'écoulement (T40) compris entre 1 et 3 secondes. En générale la poudre

de verre cause une augmentation du T40 pour toutes les combinaisons étudiées. Les combinaisons A2-A4 et PNS2-B6 montrent l'augmentation la plus importante. Par ailleurs, pour les mélanges incorporant les cendres volantes, les mélanges préparés avec les combinaisons A2-A4, PNS2-B6 montrent une augmentation importante du T40, mais pour le mélange avec la combinaison PNS2-B6 un très faible T40 a été enregistré pour un taux de remplacement de 25%, mais aucun signe d'agglomération, de blocage, ou de ressuyage n'a été observé.

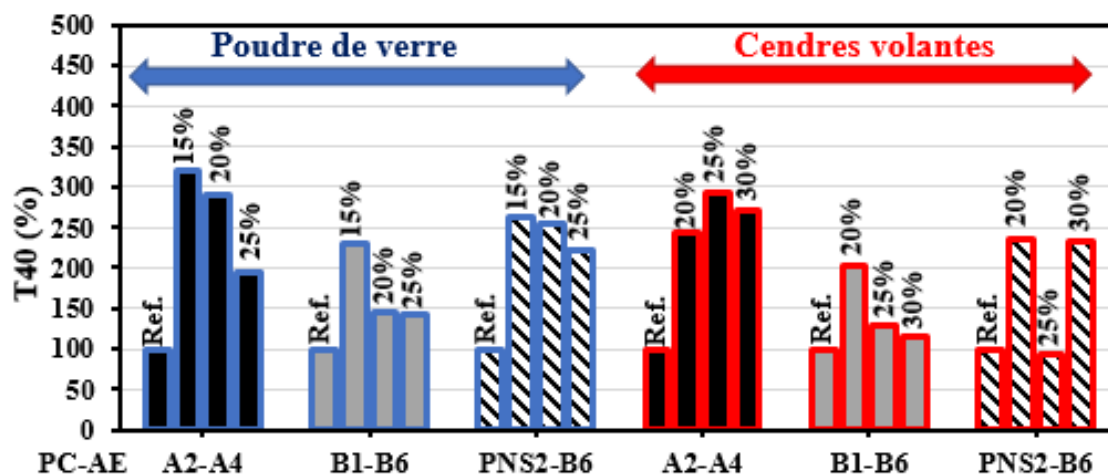


Figure 6.3 : Temps d'écoulement (T40) des MBE Résidentiels Binaire

6.4.4 Temps d'écoulement à travers le mini V-funnel

La résistance à l'écoulement des MBE-semi autoplaçant résidentiel contenant les différents dosages en ajouts minéraux est évaluée en déterminant le temps d'écoulement à travers le mini entonnoir en V. La Figure 6.4 illustre le temps d'écoulement à travers le mini entonnoir en V des MBE-semi autoplaçant résidentiels incorporant la poudre de verre et les cendres volantes. La mesure du mini V-funnel nous permet d'apprécier la facilité de passage sans blocage à travers une section étroite. Les MBE-SAP résidentiels contenant la poudre de verre présentent une bonne aptitude à l'écoulement, aucun blocage n'a été observé sauf pour le mélange A2-A4 ou un blocage a été observé pour un taux de remplacement de 15% et de 20%. Ceci est lié à leur grande viscosité. Par ailleurs, pour les mélanges résidentiels incorporant les cendres volantes aucun blocage n'a été observé et ceci quel que soit le taux de remplacement et la combinaison SP-AE utilisée. Cependant, il faut noter qu'un temps d'écoulement long est

observé avec la combinaison A2-A4 et de taux de remplacement de 20% et 25%, mais à 30% de remplacement une très bonne facilité de passage a été observé.

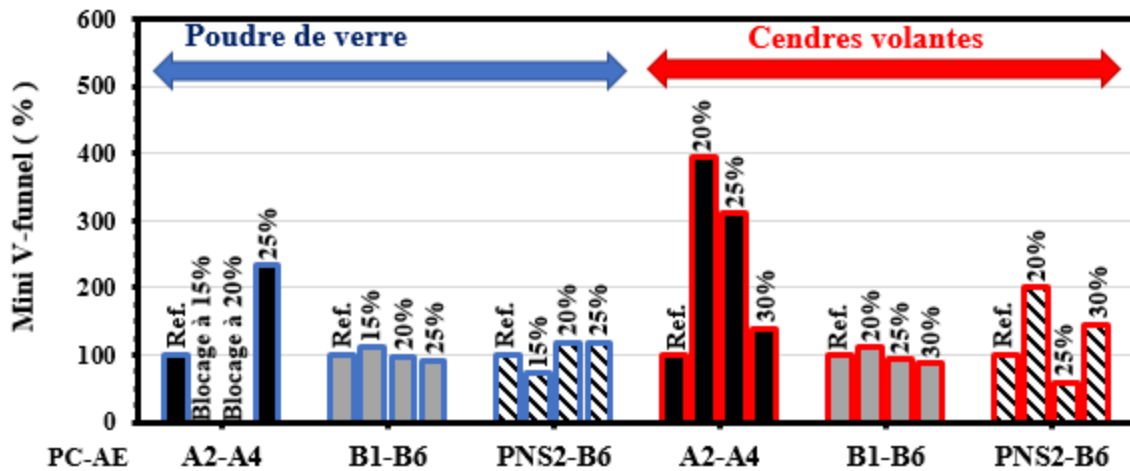


Figure 6.4 : Temps d'écoulement à travers le Mini-V funnel des MBE Résidentiel Binaire

6.4.5 Seuil de cisaillement

La fluidité des MBE-SAP résidentiel contenant des teneurs variables en ajouts cimentaires et liant alternatif est évaluée en déterminant le seuil de cisaillement à l'aide du rhéomètre à cylindres coaxiaux ConTec 6. Selon la combinaison SP-AE utilisée, le seuil de cisaillement des MBE-SAP binaires sont illustrés sur la Figure 6.5. En général, l'utilisation de la poudre de verre engendre une augmentation du seuil d'écoulement. La plus grande augmentation est observée avec un taux de remplacement de 15%. Par ailleurs, les combinaisons SP-AE étudiés ont donné des seuils de cisaillement comparable sous la combinaison B1-B6 qui montre un seuil relativement plus élevé. Dans le cas des mélanges résidentiels incorporant des cendres volantes on remarque que le seuil de cisaillement ne dépend pas seulement de taux de remplacement des cendres volantes comme dans le cas de poudre de verre, mais aussi du type de superplastifiant utilisé. En effet, on constate que le mélange préparé avec la combinaison A2-A4 a un seuil de cisaillement plus élevé pour 20 et 25% de taux de remplacement. L'utilisation de 30% des cendres volantes réduit le seuil d'écoulement dans le cas de la combinaison A2-A4. Dans le cas de la combinaison PNS2-B6, l'utilisation des cendres volantes tendent en général d'augmenter le seuil d'écoulement.

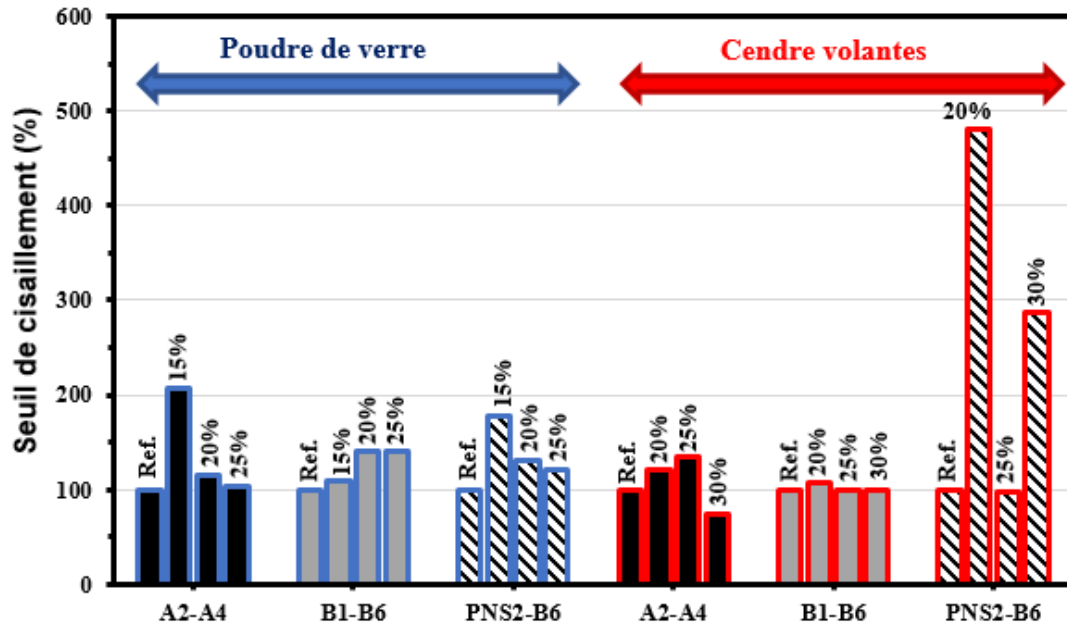


Figure 6.5 : Seuil de cisaillement des MBE Résidentiels Binaire

6.4.6 Viscosité plastique

La résistance à l'écoulement des MBE-semi autoplaçants résidentiels contenant les différents dosages en ajouts minéraux est évaluée en déterminant la viscosité plastique à l'aide du rhéomètre à cylindres coaxiaux ConTec 6. Les MBE-SAP résidentiels incorporant la poudre de verre ont des viscosités supérieures à celle des mélanges de référence de plus, l'utilisation de la poudre de verre en combinaison avec les B1-B6 et PNS2-B6 résulte en des viscosités relativement élevées. Dans le cas des MBE-SAP incorporant les cendres volantes, on ne note pas une augmentation importante de la viscosité, sauf dans le cas du taux de remplacement de 25% (B1-B6) et la combinaison PNS2-B6. En effet, on remarque que l'utilisation de 20% de remplacement des cendres volantes en combinaison avec le PNS2-B6 résulte en une viscosité importante. Ceci s'explique par le fait que le superplastifiant à base de polycarboxylate (PC) agissant par répulsions stérique et électrostatique offre une meilleure dispersion des particules, ce qui peut conduire à une diminution de la viscosité. Mais le plus important n'est pas d'avoir une viscosité faible ou très élevée, mais d'avoir une viscosité plastique adéquate pour contrôler la ségrégation statique et dynamique.

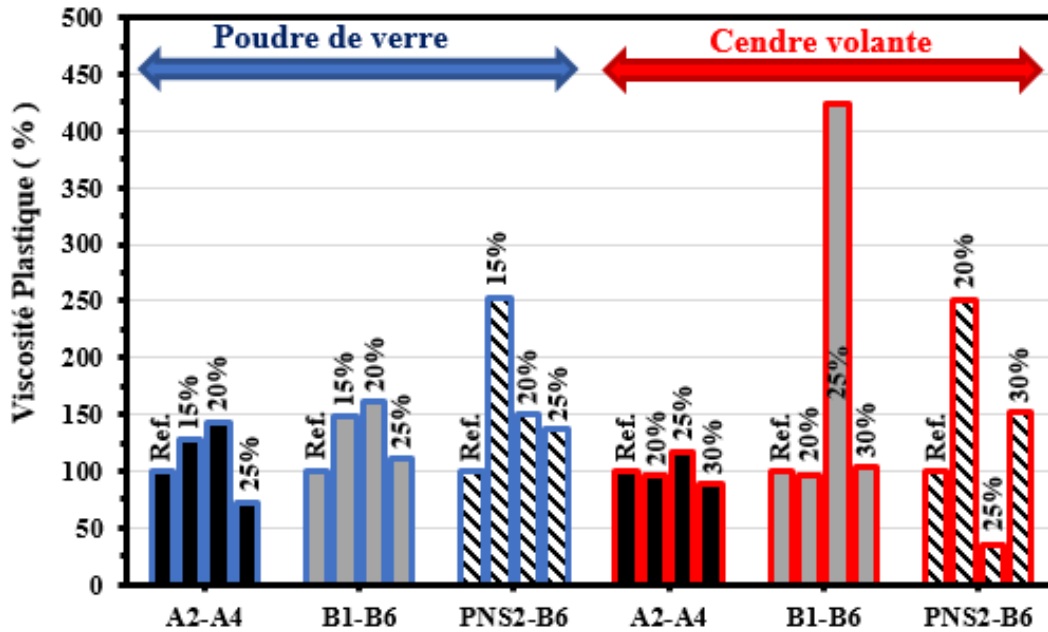


Figure 6.6 : Viscosité plastique des MBE Résidentiels

6.4.7 Résistance à la compression

L'effet du remplacement partiel du ciment par les ajouts minéraux sur le développement des résistances à la compression des MBE-SAP à 1 et 3 jours, est présenté dans les Figures 6.7 et 6.8.

Les résultats montrent que, les MBE-SAP de référence développent la plus grande résistance en compression à tous les âges comparés aux mélanges contenant de la poudre de verre ou de la cendre volante. On constate que la résistance à la compression à 1 et 3 jours diminue avec l'augmentation du taux de remplacement que ce soit avec les mélanges contenant de la poudre de verre ou des cendres volantes pour toutes les combinaisons SP-AE étudiés. On constate également que le type de SP n'a pas d'effet significatif sur le développement des résistances à un jour. Cependant, à l'âge de 3 jours (Figure 6.8), la combinaison A2-A4 montre des résistances relativement plus élevées que les autres combinaisons B1-B6 et PNS2-B6. Ceci peut être expliqué par l'efficacité de cet adjuvant à activer l'hydratation du ciment en présence de la poudre de verre. Pour une combinaison SP-AE donnée, la réduction de la résistance à la compression observée avec les cendres volantes est moins importante que celle observée avec la poudre de verre. Par ailleurs, les trois combinaisons étudiées montrent des résistances

comparables dans le cas des cendres volantes. Cette tendance est également pour les deux âges de 1 et 3 jours.

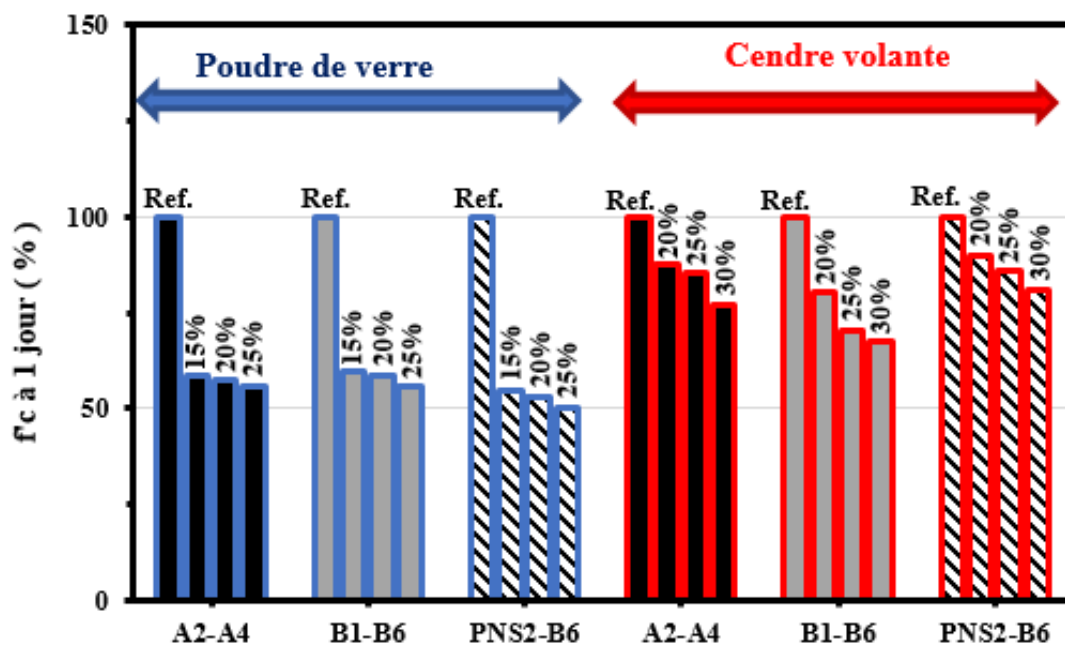


Figure 6.7 : Résistance à la compression (f'_c) à 1 jour des MBE-SAP résidentiels

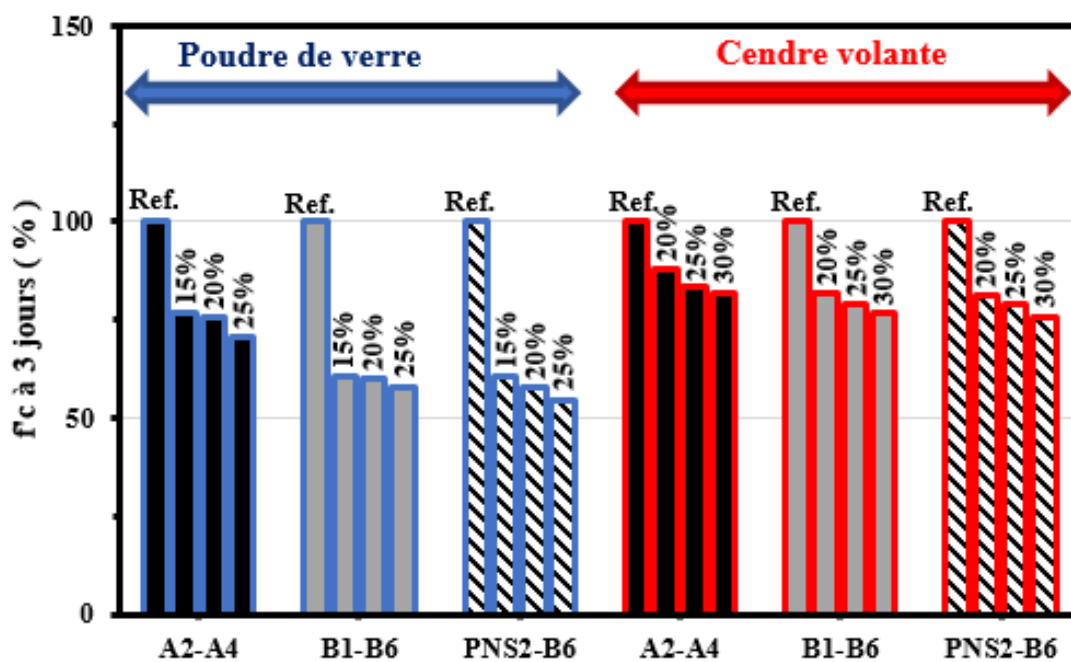


Figure 6.8 : Résistance à la compression (f'_c) à 3 jours des MBE-SAP résidentiels

6.5 Corrélation entre les résultats de MBE résidentiellles et les indices d'écoulement des poudres

Dans cette partie, les résultats des MBE résidentiellles binaires (GUb/PV) seront corrélés à celle des indices d'écoulement des poudres à savoir la dispersibilité, la compressibilité, la cohésion, la densité, la coulabilité et le déferlement. Il est important de rappeler que les mélanges de référence sont formulés avec un liant ternaire (Terc³) donc nous avons corrélés avec les indices d'écoulement de Terc³.

6.5.1 Étalement et dispersibilité de poudre de verre

La Figure 6.9 illustre la corrélation entre le mini-étalement des MBE résidentiellls Binaire (GU/PV) et la dispersibilité de la poudre de verre. On observe que la dispersibilité de la poudre de verre affecte la fluidité du mélange, mais elle dépend de la combinaison SP-AE utilisée. Dans le cas le mélange de référence et le mélange incorporant la poudre de verre en présence de la combinaison A2-A4, on remarque que la fluidité du mélange augmente avec la diminution de la dispersibilité de la poudre de verre. Cependant, en présence de la combinaison B1-B6 et PNS2-B6 la dispersibilité de poudre n'a pas d'effet significative sur la fluidité du mélange. Ceci peut être expliqué par l'interaction entre les caractéristiques de la poudre et le type de la combinaison SP-AEA.

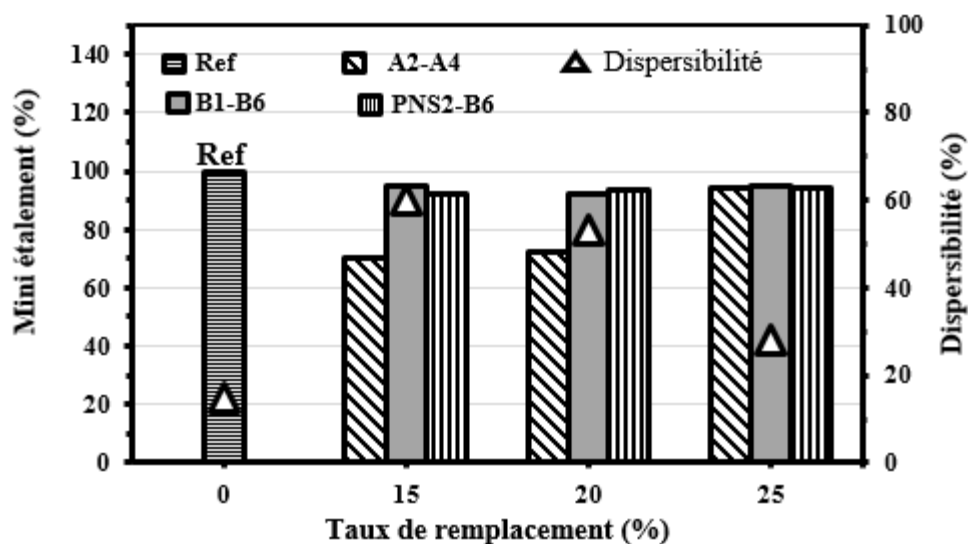


Figure 6.9 : Corrélation entre le Mini étalement des MBE-SAP résidentiellls et la dispersibilité de la poudre de verre

6.5.2 Étalement et cohésion de poudre de verre

La figure 6.10 illustre la corrélation entre le mini-étalement des MBE Résidentiels et la cohésion de poudre de verre. On remarque que la cohésion varie trop peu et ne semble pas avoir un effet sur la fluidité du mélange.

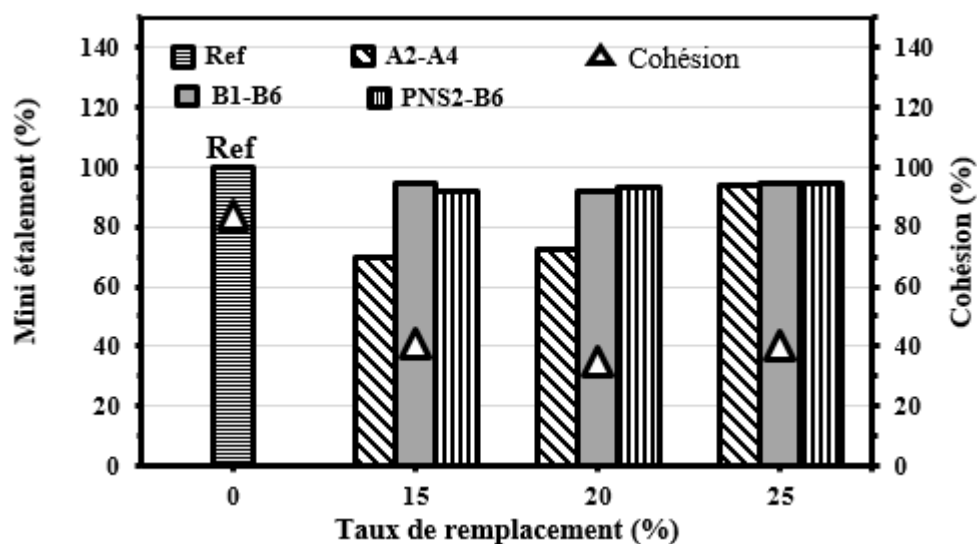


Figure 6.10 : Corrélation entre le Mini étalement des MBE résidentiels et la cohésion de poudre de verre

6.5.3 Étalement et déferlement de poudre de verre

La Figure 6.11 illustre la corrélation entre le mini-étalement des MBE-SAP résidentiels et le déferlement de la poudre de verre. On remarque que pour le mélange formulé avec la combinaison A2-A4 plus le déferlement de la poudre de verre est faible, meilleur sera la fluidité du mélange. Cependant, en présence des combinaisons B1-B6 et PNS2 l'effet de déferlement ne semble pas avoir un effet significatif sur la fluidité.

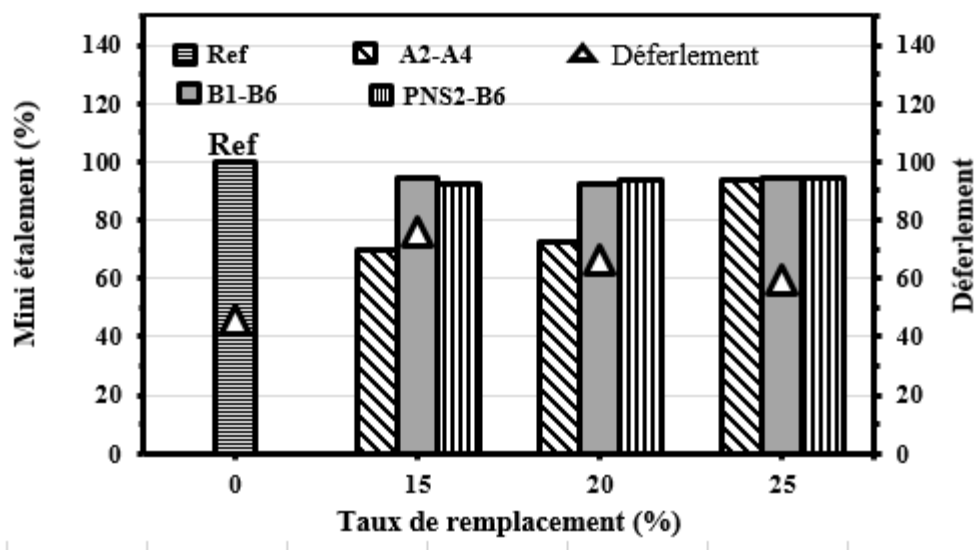


Figure 6.11 : Corrélation entre le mini-étalement des MBE-SAP résidentiels et le déferlement de la poudre de verre

6.5.4 Rétention de la fluidité et dispersibilité de la poudre de verre

La Figure 6.12 représente la corrélation entre la Rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE Résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre on constate que la dispersibilité de la poudre n'a pas d'effet significatif sur la rétention de la fluidité des mélanges incorporant la poudre de verre. La rétention de la fluidité dépend plus de l'efficacité de superplastifiant à maintenir la fluidité dans le temps. On peut tout de même noter qu'une faible dispersibilité correspond à une forte rétention de la fluidité dans le temps. Par contre, pour les mélanges incorporant la combinaison B1-B6 et PNS2-B6, la rétention dépend plus du taux de remplacement et une faible dispersibilité ne correspond pas forcément à une forte ou une faible rétention.

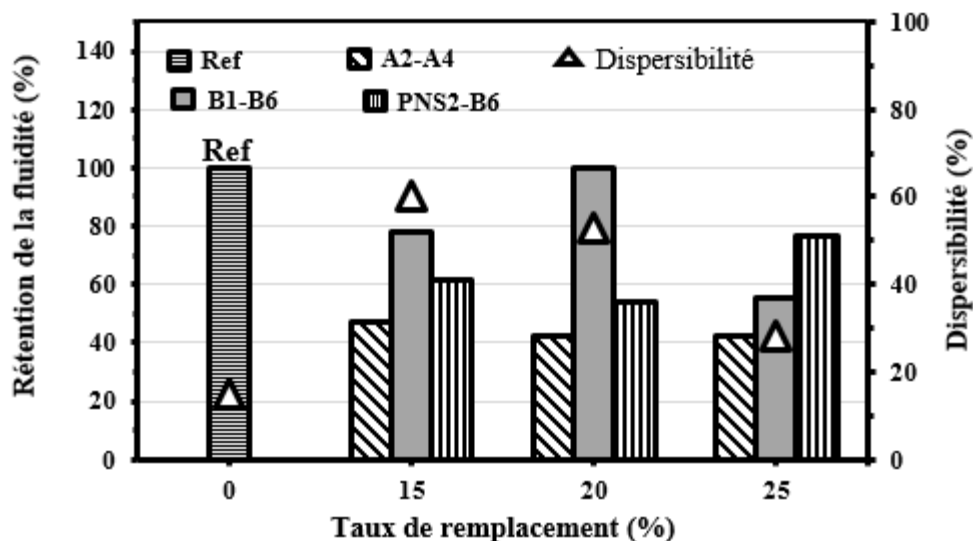


Figure 6.12 : Corrélation entre la Rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE-SAP résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre

6.5.5 Rétention de la fluidité et coulabilité de poudre de verre

La Figure 6.13 illustre la corrélation entre la rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE-SAP résidentiels et la coulabilité de la poudre de verre. On constate que l'ampleur de l'effet de la coulabilité de la poudre de verre dépend de la combinaison utilisée et du taux de remplacement de la poudre de verre. En présence de la combinaison A2-A4, on observe que plus la coulabilité de la poudre verre est importante plus mauvais sera le maintien de la fluidité du mélange. En gros, la coulabilité varie trop peu et ne semble pas avoir d'effet sur la rétention. En revanche, en présence de la combinaison B1-B6, une bonne rétention de la fluidité est observée avec 20% de la poudre de verre. Cependant, en présence de la combinaison PNS2-B6 le seuil de remplacement de la poudre de verre est situé à 20% au-delà de ce limité la rétention de la fluidité sera mauvaise.

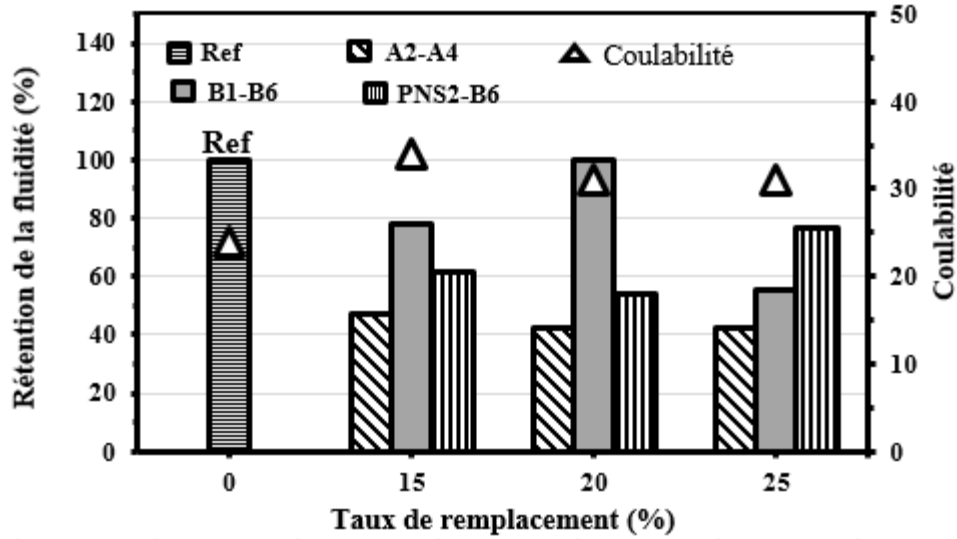


Figure 6.13 : Corrélation entre la rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE-SAP résidentiels et la coulabilité de la poudre de verre

6.5.6 Rétention de la fluidité et déferlement de poudre de verre

La Figure 6.14 représente la corrélation entre la Rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE résidentiels et le déferlement de la poudre de verre. Les résultats montrent qu'en présence de la combinaison A2-A4, plus le déferlement de la poudre est faible meilleur sera la rétention de la fluidité du mélange. Cependant en présence de la combinaison B1-B6, une légère augmentation a été notée à 20% de remplacement de la poudre de verre. Par contre, en présence de la combinaison PNS2-B6, la rétention de la fluidité diminue avec l'augmentation du pourcentage de substitution jusqu'à 20%, puis augmente à 25% de remplacement. Donc, l'effet de déferlement sur la fluidité en présence de PNS2-B6 est plus lié au taux de remplacement de poudre du verre.

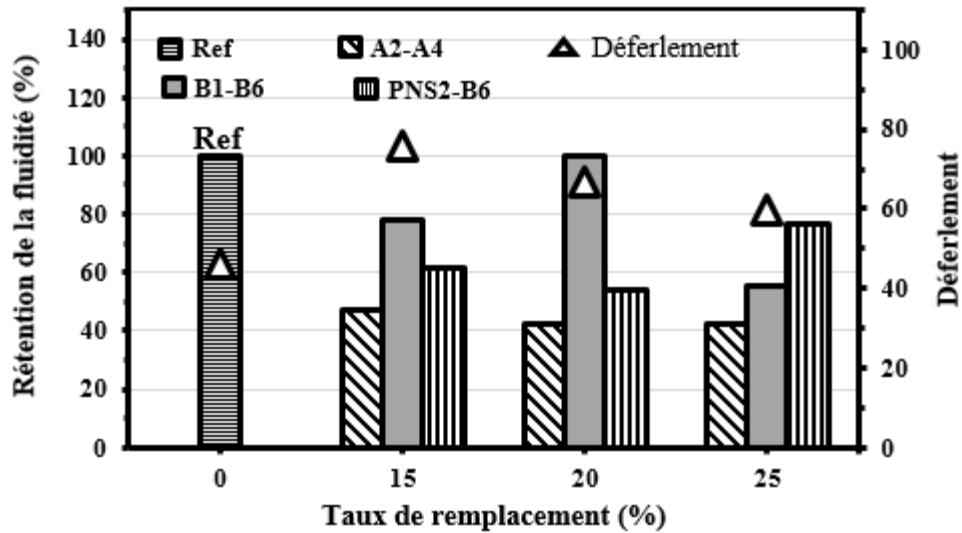


Figure 6.14 : Corrélation entre la Rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE résidentiels et le déferlement de la poudre de verre

6.5.7 Temps d'écoulement T40 et dispersibilité de poudre de verre

La Figure 6.15 illustre la corrélation entre le temps d'écoulement T40 des MBE-SAP résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre. Les résultats obtenus montrent que le temps d'écoulement T40 dépend fortement de la dispersibilité de la poudre de verre. De ce fait, on en déduit que plus la dispersibilité de poudre est faible meilleur sera le temps d'écoulement T40 du mélange, c'est-à-dire une faible viscosité.

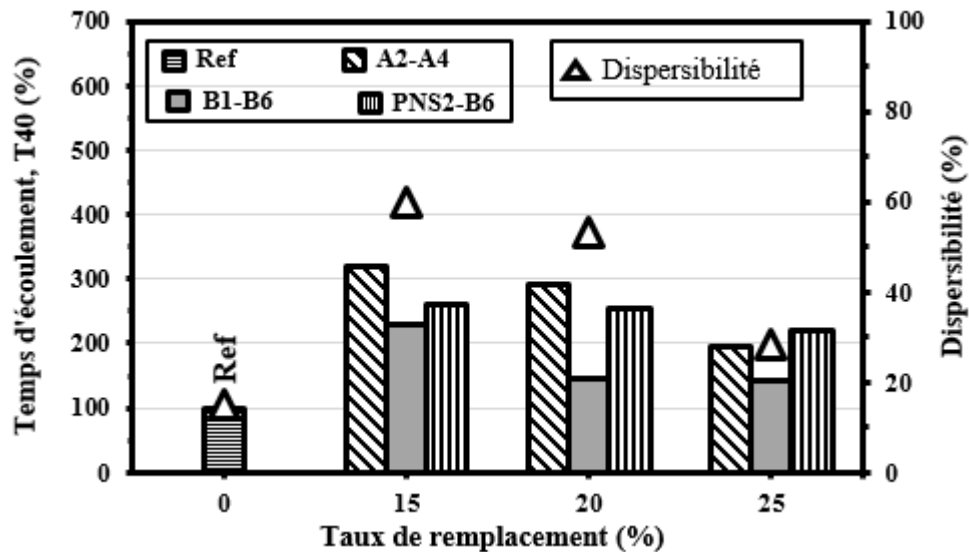


Figure 6.15 : Corrélation entre temps d'écoulement T40 des MBE résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre

6.5.8 Temps d'écoulement T40 et déferlement de la poudre de verre

La Figure 6.16 illustre la corrélation entre le temps d'écoulement T40 des MBE résidentiels et le déferlement de la poudre de verre. Les résultats obtenus montrent que le temps d'écoulement T40 dépend aussi fortement de déferlement de la poudre de verre. Plus le déferlement de la poudre est faible, meilleur sera le temps d'écoulement du mélange incorporant la poudre de verre.

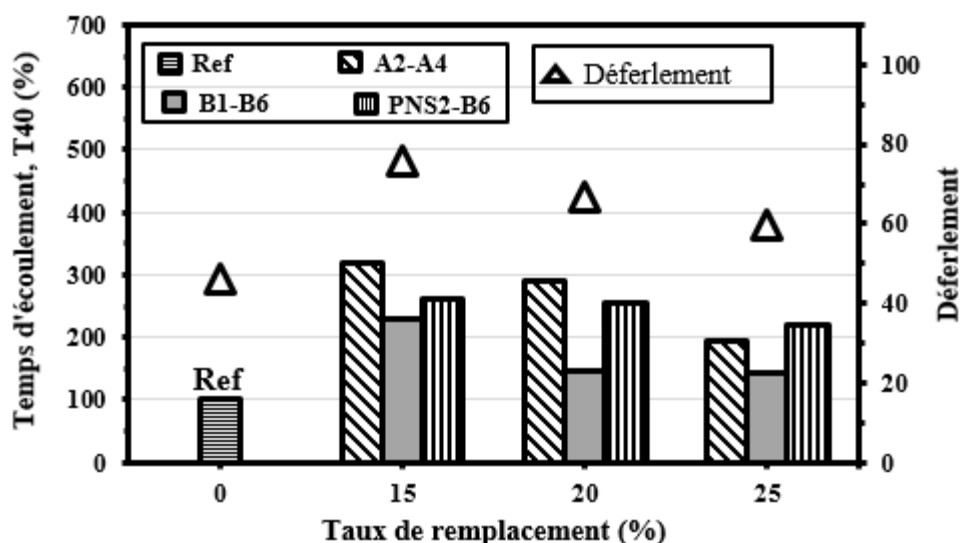


Figure 6.16 : Corrélation entre temps d'écoulement T40 des MBE-SAP résidentiels et le déferlement de la poudre de verre

6.5.9 Temps d'écoulement à travers le V-funnel et la dispersibilité de la poudre de verre

La Figure 6.17 illustre la corrélation entre temps d'écoulement à travers (mini-V-funnel) des MBE-SAP résidentiels et la dispersibilité de poudre de verre. Les résultats montrent qu'une faible dispersibilité de poudre verre entraîne, en général une bonne facilité de passage à travers le mini V-funnel et, par conséquent, résulte en un temps d'écoulement court. Par contre, une forte dispersibilité entraîne soit un temps d'écoulement long ou soit un blocage. Pour les MBE-SAP résidentiels incorporant la poudre de verre, au-delà de 60% de dispersibilité si l'efficacité du superplastifiant utilisé n'est pas très satisfaisante, le blocage survient.

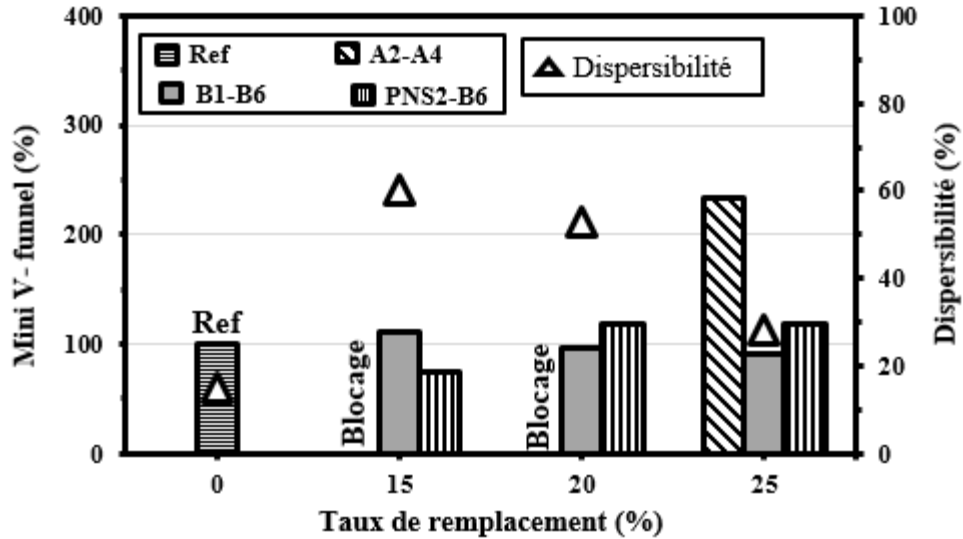


Figure 6.17 : Corrélation entre le temps d'écoulement à travers le mini-V-funnel des MBE résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre

6.5.10 Temps d'écoulement à travers le V-funnel et le déferlement de la poudre de verre

La Figure 6.18 illustre la corrélation entre le temps d'écoulement au mini-V-funnel des MBE résidentiels et le déferlement de la poudre de verre. Les résultats obtenus montrent qu'un faible déferlement de la poudre verre entraine une bonne facilité de passage sans blocage à travers le mini V-funnel. Cependant, un fort déferlement entraine soit un temps d'écoulement long ou soit un blocage dépendamment de la combinaison utilisée. Par exemple comme dans le cas de la dispersibilité de la poudre de verre, les MBE-SAP résidentiels incorporant la poudre de verre au-delà d'un indice de dispersibilité de 80 si l'efficacité du superplastifiant utilisé n'est pas très satisfaisant et compatible avec l'ajout utilisé le blocage survient.

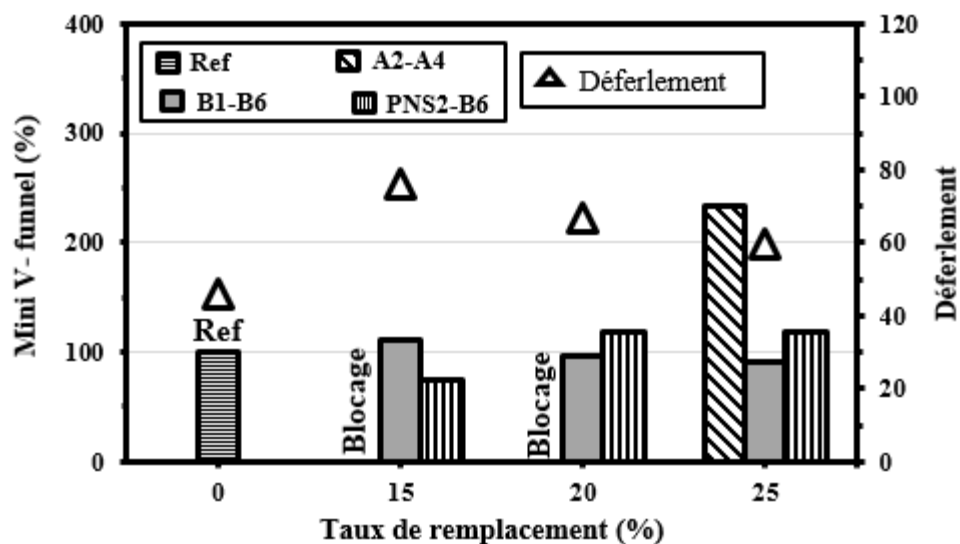


Figure 6.18 : Corrélation entre le temps d'écoulement mini-V-funnel des MBE résidentiels et le déferlement de la poudre de verre

6.5.11 Seuil de cisaillement et la dispersibilité de la poudre de verre

La Figure 6.19 illustre le seuil de cisaillement des MBE résidentiels et la dispersibilité de poudre du verre. Les résultats obtenus montrent que la dispersibilité de la poudre de verre affecte le seuil de cisaillement. Pour le mélange avec les combinaisons A2-A4 et PNS2-B6, le seuil de cisaillement diminue avec la diminution de la dispersibilité et l'augmentation du taux de remplacement de la poudre de verre sauf, pour le mélange avec combinaison B1-B6.

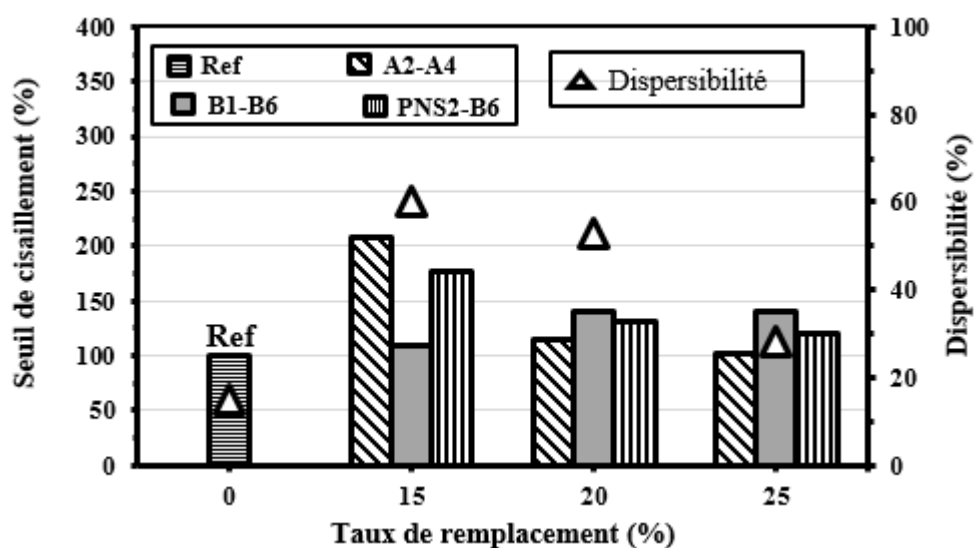


Figure 6.19 : Corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre

6.5.12 Seuil de cisaillement et la coulabilité de la poudre de verre

La Figure 6.20 illustre le seuil de cisaillement des MBE-SAP résidentiels et la coulabilité de poudre de verre. On constate que pour le mélange avec la combinaison A2-A4 et PNS2-B6 qu'une faible coulabilité de poudre verre entraine une réduction de seuil de cisaillement. Par contre, avec la combinaison B1-B6 nous avons enregistré une augmentation du seuil. Il faut toutefois noter qu'à 20% et 25% de remplacement de poudre de verre, la coulabilité de la poudre est constante, mais on observe une légère diminution de seuil de cisaillement. Dans ce cas il est probable que le type de SP a un effet plus important sur le seuil.

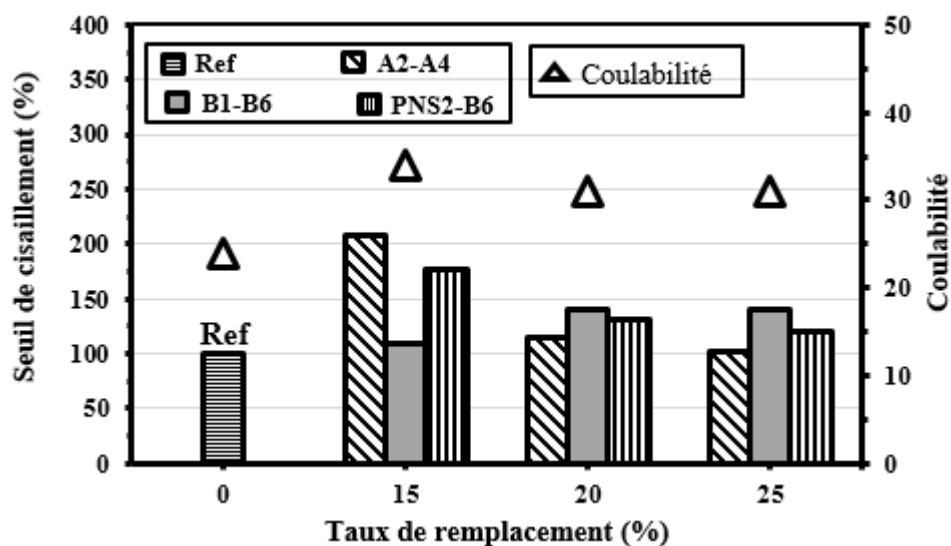


Figure 6.20 : Corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE-SAP résidentiels et la coulabilité de la poudre de verre

6.5.13 Seuil de cisaillement et déferlement de poudre de verre

La Figure 6.21 illustre le seuil de cisaillement de MBE Résidentiel Binaire (GU/PV) et la coulabilité de poudre de verre. Les résultats montrent que le déferlement de la poudre de verre influence le seuil de cisaillement des mélanges. On observe que plus le déferlement de poudre est faible, plus le seuil de cisaillement du mélange résidentiel incorporant la poudre de verre diminue. sauf, en présence de la combinaison B1-B6, l'effet de déferlement ne semble pas affecter le seuil de cisaillement. Il est probable que le type SP a un effet plus important sur le seuil.

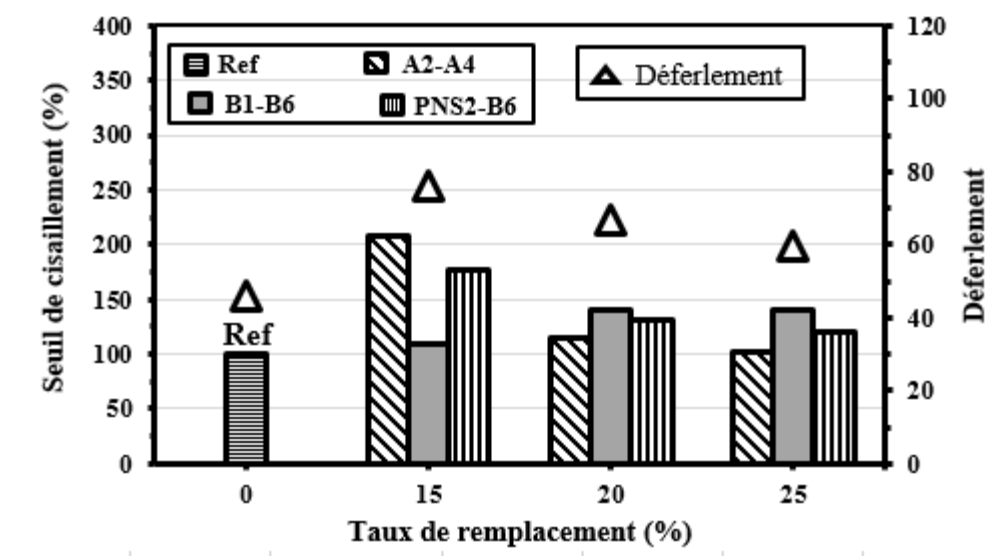


Figure 6.21 : Corrélation entre le seuil de cisaillement de MBE Résidentiel Binaire (GU/PV) et déferlement de poudre de verre

6.5.14 Viscosité et dispersibilité de poudre de verre

La Figure 6.22 représente la corrélation entre la viscosité des MBE-SAP résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre. On constate que la viscosité de mélange avec la combinaison PNS2-B6 (à base de polynaphtalène) est plus influencé par la dispersibilité de poudre de verre que le mélange à base de polycarboxylate (les combinaisons B1-B6 et A2-A4). Il faut toutefois noter que pour les mélanges à base de polycarboxylate, il existe un seuil de 20% de remplacement de la poudre verre. Au-delà de ce seuil la viscosité plastique du mélange diminue avec la dispersibilité de la poudre de verre.

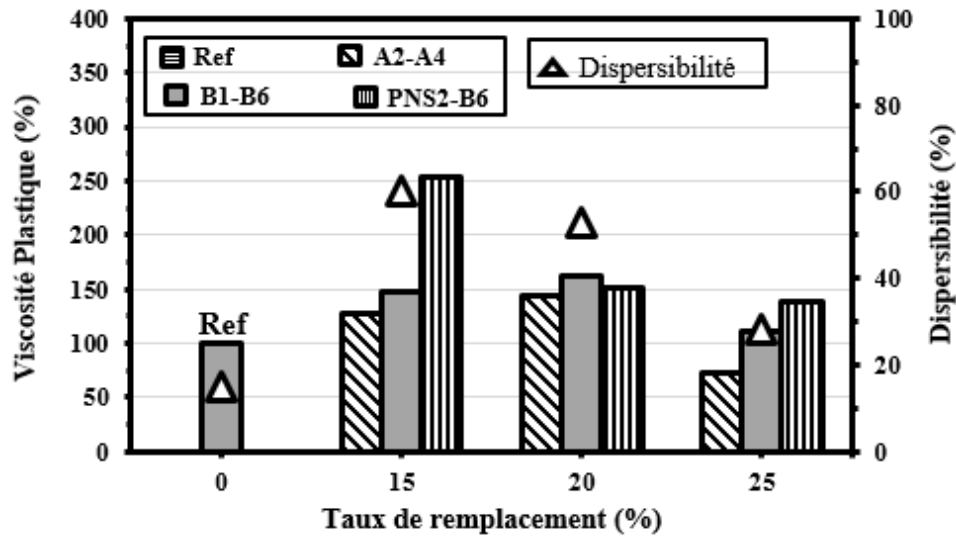


Figure 6.22 : Corrélation entre la viscosité plastique des MBE résidentiels et la dispersibilité de la poudre de verre

6.5.15 Résistance à la compression et déferlement de la poudre de verre

Les Figure 6.23 et 6.24 illustrent la corrélation entre la résistance en compression (f_c) à 1 jour et 3 jours des MBE-SAP résidentiels et le déferlement de la poudre de verre. On observe que le déferlement de poudre de verre affecte la résistance à la compression des mélanges binaires résidentiels incorporant la poudre de verre. Cependant, plus le déferlement de poudre verre est importante plus grand sera la résistance en compression à jeune âge. Il faut toutefois noter que cette influence peut être causée par l'ajout de matériaux cimentaire faiblement réactif.

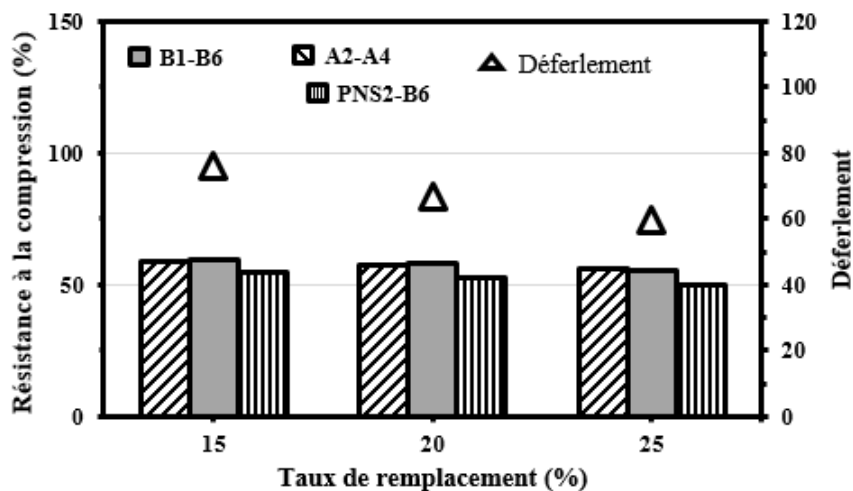


Figure 6.23 : Corrélation entre la résistance à la compression (f_c) à 1 jour des MBE-SAP résidentiels et le déferlement de la poudre de verre

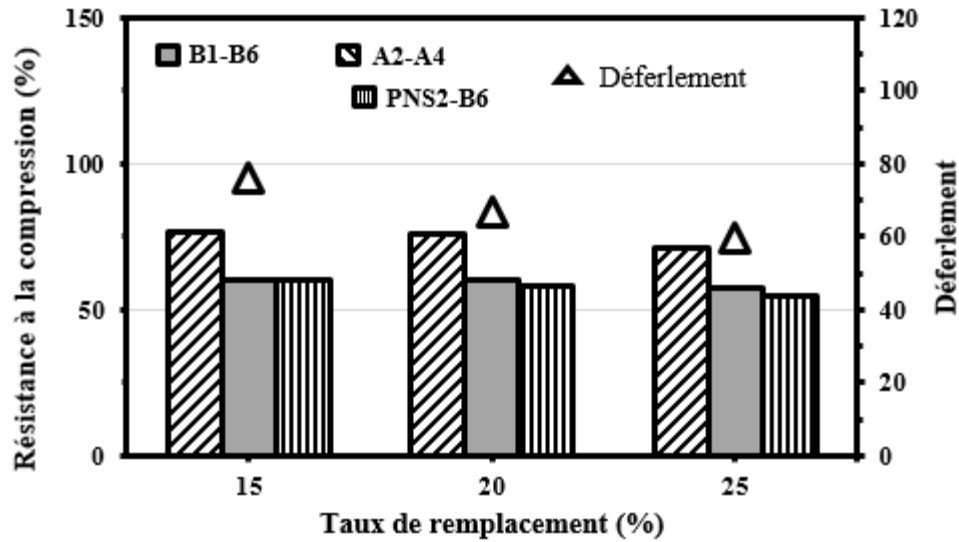


Figure 6.24 : Corrélation entre la résistance en compression (f'_c) à 3 jour des MBE-SAP résidentiels et le déferlement de la poudre de verre

2. MBE-SAP pour les infrastructures

6.5.16 Mini-étalement

La fluidité des MBE-SAP pour l'infrastructure contenant 15, 20 et 25% de poudre de verre et 20, 25 et 30% des cendres volantes est évaluée en déterminant l'étalement au mini-cône. Selon la combinaison SP-AE, le diamètre moyen de l'étalement des MBE-SAP pour l'infrastructure sont présentés dans le Figure 6.24. Les résultats obtenus montrent que la fluidité des MBE-SAP pour l'infrastructure dépend de type de superplastifiant mais aussi de la teneur en ajout minéral. Les mélanges contenant la poudre de verre (15% à 25%), en présence de la combinaison B2-B6 a engendré une faible fluidité comparée au mélange de référence et ceux contenant les combinaisons C2-B6 et PNS2-B6. Cependant, les mélanges contenant la cendre volante (20% à 30%) en présence de la combinaison B2-B6 et PNS2-B6 engendrent une fluidité pratiquement égale à celle de mélange de référence.

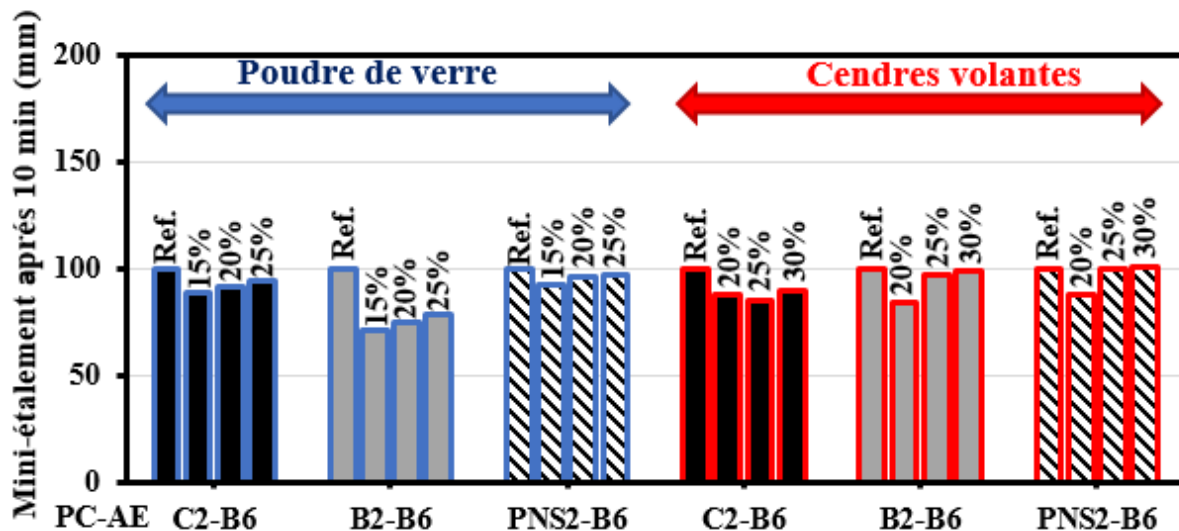


Figure 6.25 : Mini-étalement après 10 min des MBE-SAP pour l'infrastructure

6.5.17 Rétention de la fluidité

La perte de fluidité dans le temps des MBE-SAP pour l'infrastructure, soit la perte d'étalement, est présentée sur la Figure 6.26. En général, tous les types de PC et PNS employés démontrent une perte de fluidité dans le temps. La plus faible rétention est enregistrée avec la combinaison PNS2-B6. Par contre l'utilisation de la combinaison C2-B6 et B2-B6 a permis d'avoir une meilleur rétention de la fluidité. L'utilisation de la poudre de verre (jusqu'à 20%) avec la combinaison B2-B6 présente un gain de fluidité.

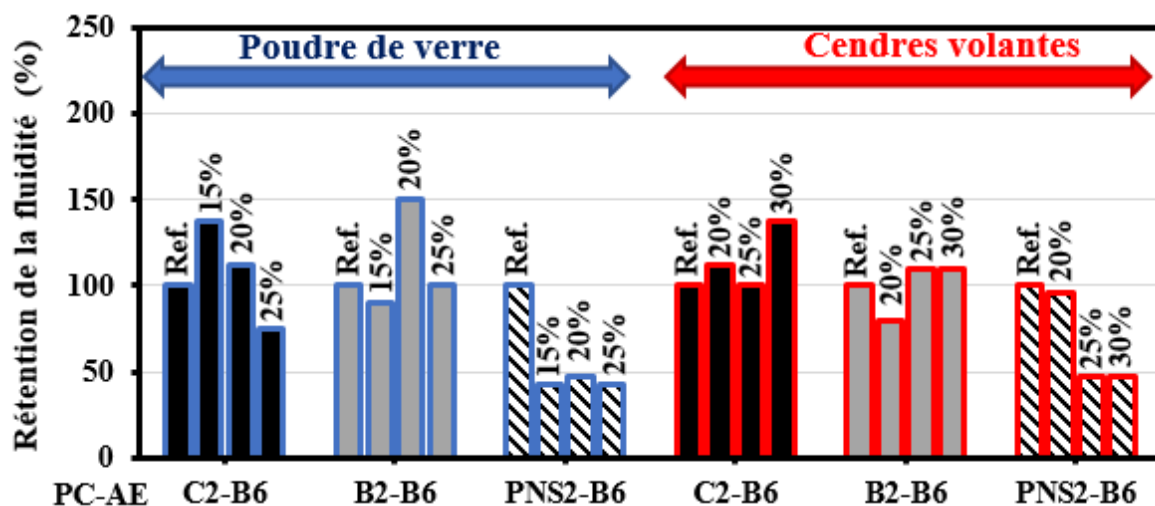


Figure 6.26 : Rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE-SAP pour l'infrastructure

6.5.18 T40 du MBE

La Figure 6.27 illustre le temps d'écoulement T40 des MBE-SAP pour l'infrastructure. Le temps d'écoulement T40 recommandé pour les MBE-SAP est de 2 à 7 secondes pour avoir des viscosités appropriées et une bonne stabilité. Dans cette étude, les différents MBE pour l'infrastructure incorporant la poudre de verre ont présenté des temps d'écoulement T40 compris entre 1,77 et 3,08 secondes alors que les MBE-SAP pour l'infrastructure incorporant les cendre volantes ont présenté des temps d'écoulement (T40) compris entre 1,10 et 3,60 secondes. De ce fait, on constate que tous les mélanges étudiés ont présentés des valeurs qui respecte cette recommandation sauf pour un taux de remplacement de 20% à 25% le mélange contenant le poudre de verre avec la combinaison C2-B6 et le mélange contenant les cendres volantes avec les combinaisons B2-B6 et le PNS2-B6 ont présenté des valeurs faibles par rapport à ce qui est recommandé, mais sans compromettre la stabilité des mélanges, aucun signe de blocage, de ressuage ou d'agglomération n'a été observé.

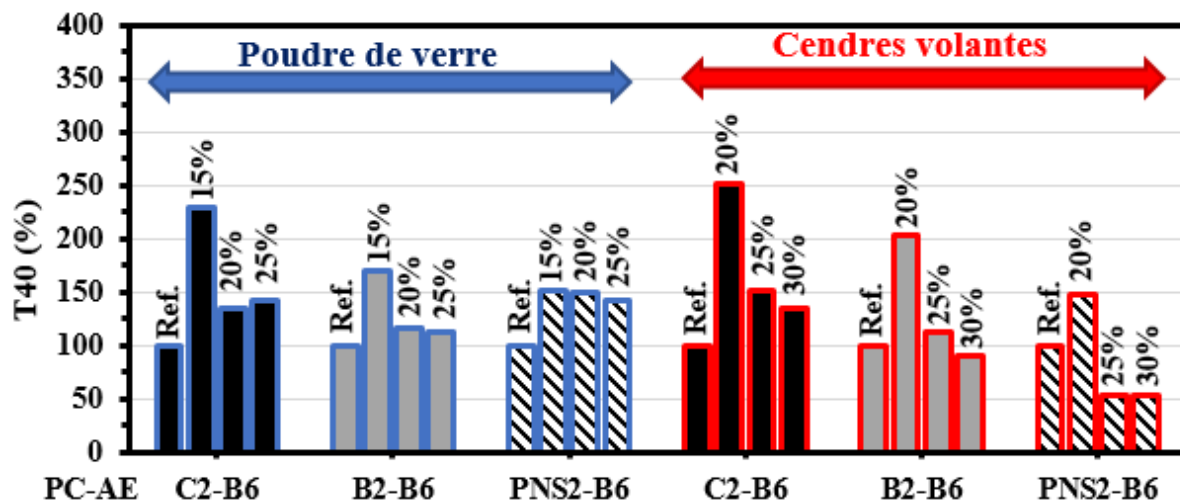


Figure 6.27 : Temps d'écoulement T40 des MBE-SAP pour l'infrastructure

6.5.19 Temps d'écoulement à travers le mini V-funnel

La résistance à l'écoulement des MBE-SAP pour l'infrastructure contenant les différents dosages en ajouts minéraux est évaluée en déterminant le temps d'écoulement à travers l'entonnoir en V. La Figure 6.28 illustre le temps d'écoulement à travers le mini entonnoir en

V des MBE-SAP pour l'infrastructure incorporant la poudre de verre et les cendres volantes. La mesure du mini-V funnel nous permet d'apprécier la facilité de passage sans blocage à travers une section étroite. Les MBE-SAP pour l'infrastructure contenant la poudre de verre ont tous présenté un blocage lors de l'écoulement à travers le mini V-funnel sauf le mélange avec la combinaison C2-B6 avec un taux de remplacement de 20% et 25% ou aucun blocage n'a été observé. Ceci peut être lié à la compatibilité du SP utilisé et la poudre de verre. Dans les cas des cendres volantes, on constate qu'à un taux de remplacement de 20% tous les mélanges ont présenté un blocage quel que soit le SP-AE utilisé. Par contre à 25% et 30% de remplacement, aucun blocage n'a été observé avec les combinaisons B2-B6 et PNS2-B6. Cependant, l'utilisation d'une combinaison C2-B6 résulte en un blocage a été observé.

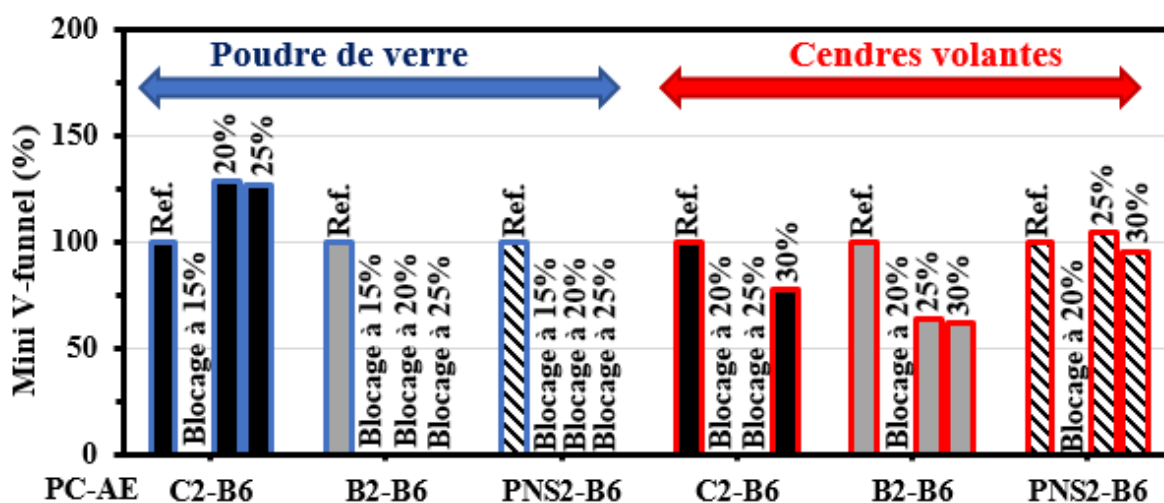


Figure 6.28 : Temps d'écoulement à travers le mini-V funnel des MBE-SAP pour l'infrastructure

6.5.20 Seuil de cisaillement

La fluidité des MBE-SAP pour l'infrastructure contenant des teneurs variables en ajouts cimentaires et liant alternatif est évaluée en déterminant le seuil de cisaillement à l'aide du rhéomètre à cylindres coaxiaux ConTec 6. Selon la combinaison SP-AE utilisée, le seuil de cisaillement des MBE-SAP sont illustrés sur la Figure 6.29. La poudre de verre engendre une augmentation du seuil de cisaillement, la plus grande augmentation est observée avec un taux de remplacement de 15%. Dans le cas des MBE-SAP pour l'infrastructure incorporant des

cendres volantes, on remarque que le seuil de cisaillement dépend du taux de remplacement, mais aussi du type de superplastifiant utilisé.

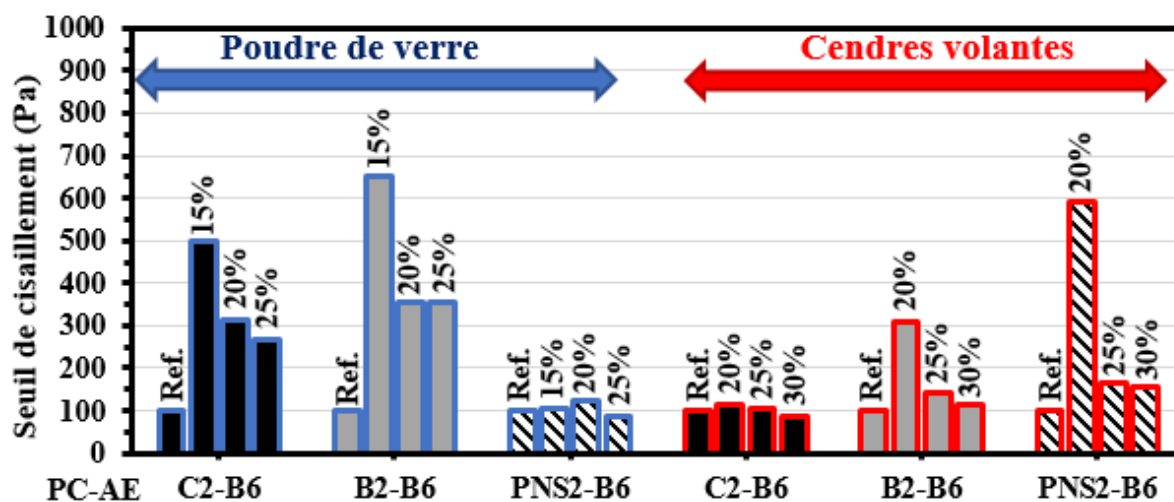


Figure 6.29 : Seuil de cisaillement des MBE-SAP pour l'infrastructure

6.5.21 Viscosité plastique

La résistance à l'écoulement des MBE-SAP pour l'infrastructure contenant les différents dosages en ajouts minéraux est évaluée en déterminant la viscosité plastique à l'aide du rhéomètre à cylindres coaxiaux ConTec 6. La Figure 6.30 montre que les mélanges des MBE pour l'infrastructure incorporant de la poudre de verre dépendent de l'efficacité de SP-AE utilisé, mais aussi de taux de remplacement de la poudre de verre. Cependant, pour les mélanges incorporant la poudre de verre en présence des combinaisons PNS2-PC et PC-B2-B6, le seuil de remplacement de poudre de verre est de 20% au-delà de cette limite la viscosité augmente. De plus, l'utilisation de la poudre de verre en combinaison avec les C2-B6 et B2-B6 résulte en des viscosités relativement faibles par rapport à la combinaison PNS2-B6. Dans le cas des MBE-SAP pour l'infrastructure incorporant les cendres volantes la viscosité du mélange dépend plus de l'efficacité de SP utilisé que du taux de remplacement des cendres volantes. Cependant, le mélange incorporant les cendres volantes, en présence de la combinaison C2-B6 est la moins visqueuse. Ceci s'explique par le fait que le superplastifiant à base de PC par leur répulsion stérique et électrostatique offre une meilleure dispersion des particules, ce qui peut conduire à une diminution de la viscosité. Mais le plus important n'est

pas d'avoir une viscosité faible ou très élevée mais d'avoir une viscosité plastique adéquate pour contrôler la ségrégation statique et dynamique.

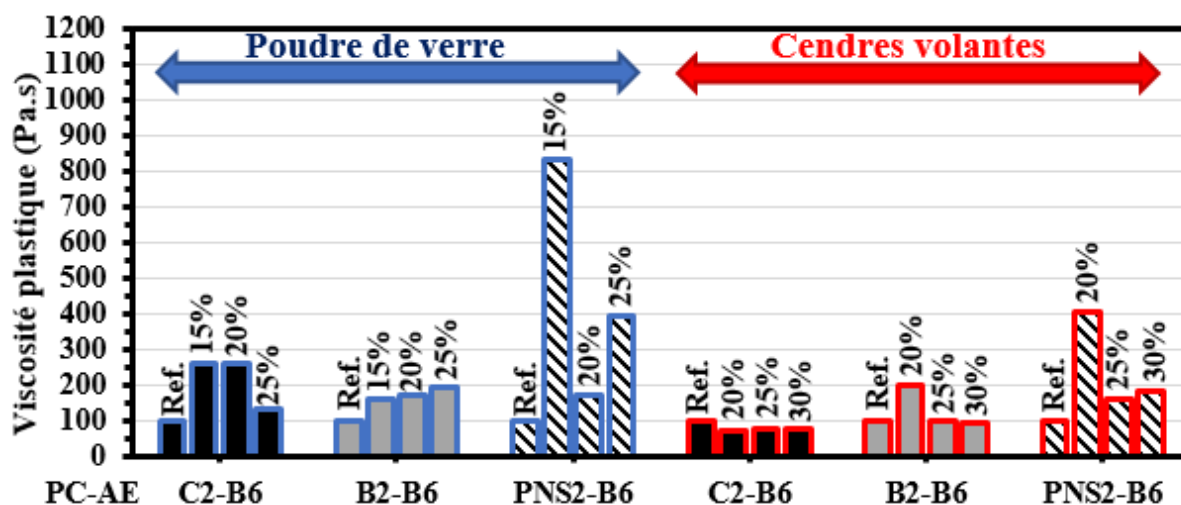


Figure 6.30 : Viscosité plastique des MBE-SAP pour l'infrastructure (systèmes binaires)

6.5.22 Résistance à la compression

L'effet du remplacement partiel du ciment par les ajouts minéraux sur le développement des résistances à la compression des MBE-SAP pour l'infrastructure à 1 et 3 jours, sont présentés dans les figures 6.31 et 6.32.

On constate que le type de SP n'a pas d'effet significatif sur le développement des résistances à jeune âge. Par ailleurs les mélanges contenant les cendres volantes ont une résistance plus élevée que celle avec de la poudre de verre. Ceci peut être lié à l'efficacité de la réaction pouzzolanique des cendres volantes. Cependant, les combinaisons étudiées montrent des résistances comparables.

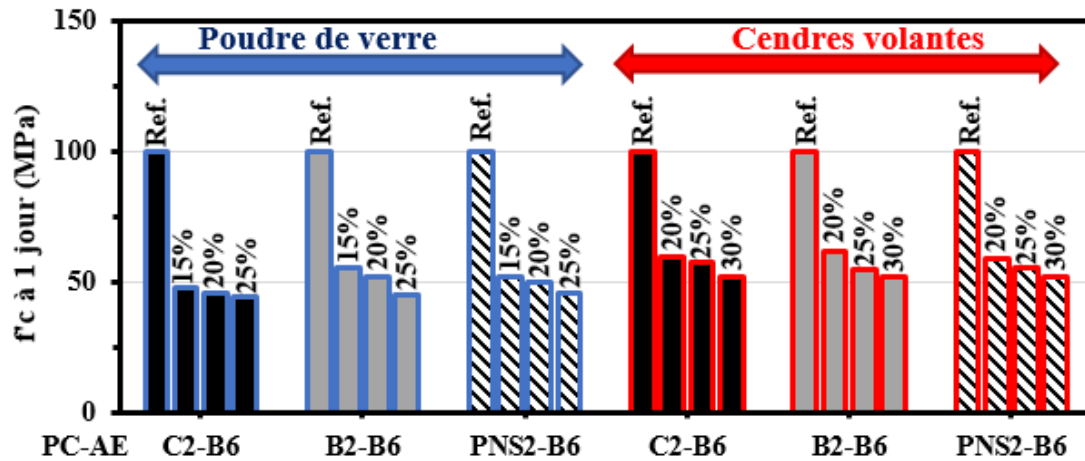


Figure 6.31 : Résistance à la compression (f'_c) à 1 jour des MBE-SAP pour l'infrastructure

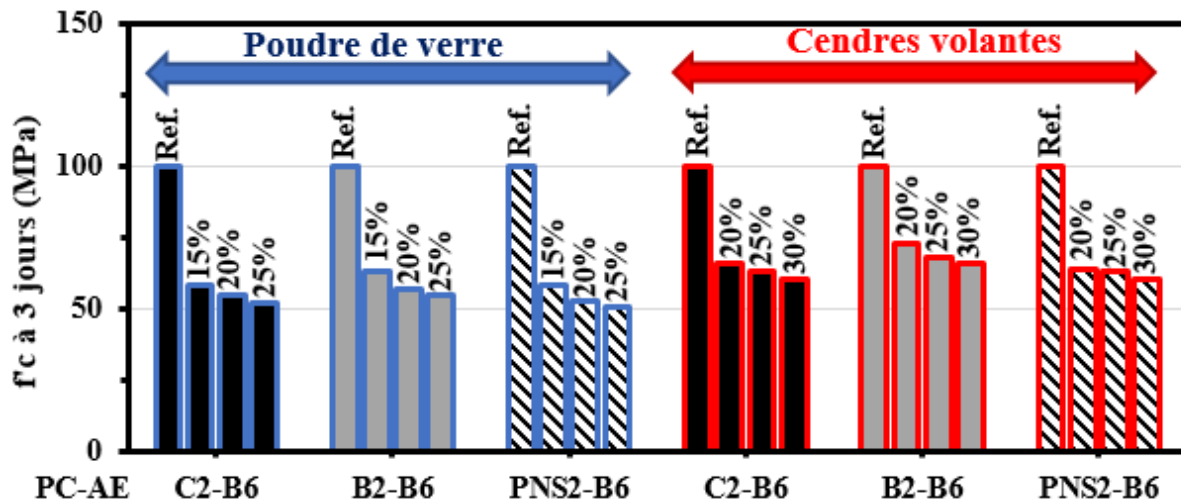


Figure 6.32 : Résistance à la compression (f'_c) à 3 jours des MBE-SAP pour l'infrastructure

6.6 Corrélation entre les résultats de MBE pour l'infrastructure et les indices d'écoulement des poudres

Dans cette partie, les résultats des MBE-SAP destinés pour l'infrastructure seront corrélés à celle des indices d'écoulement des poudres à savoir la dispersibilité, la compressibilité, la cohésion, la densité, la coulabilité et le déferlement. Il est important de rappeler que les mélanges de référence sont formulés avec un liant ternaire (Terc^3), donc nous avons corrélés avec les indices d'écoulement de TerC^3 .

6.6.1 Étalement et dispersibilité de poudre de verre

La Figure 6.33 montre la corrélation entre le mini-étalement initial des MBE-SAP destinés pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre. On observe que la dispersibilité de la poudre affecte fortement la fluidité des mélanges. Cependant, la fluidité du mélange augmente avec la diminution de la dispersibilité de la poudre de verre.

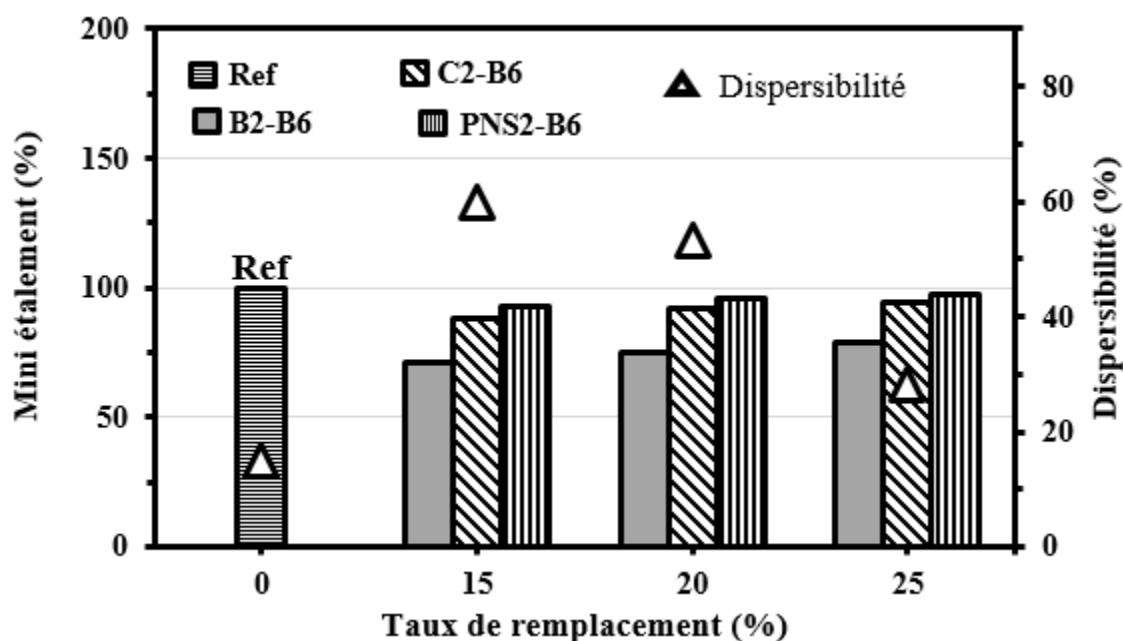


Figure 6.33 : Corrélation entre le mini-étalement des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre

6.6.2 Étalement et le déferlement de la poudre verre

La Figure 6.34 illustre la corrélation entre le mini-étalement initial des MBE-SAP destinés pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre. On remarque que la fluidité des mélanges est très affectée par le déferlement de la poudre de verre. Plus le déferlement de poudre est faible meilleur est la fluidité du mélange.

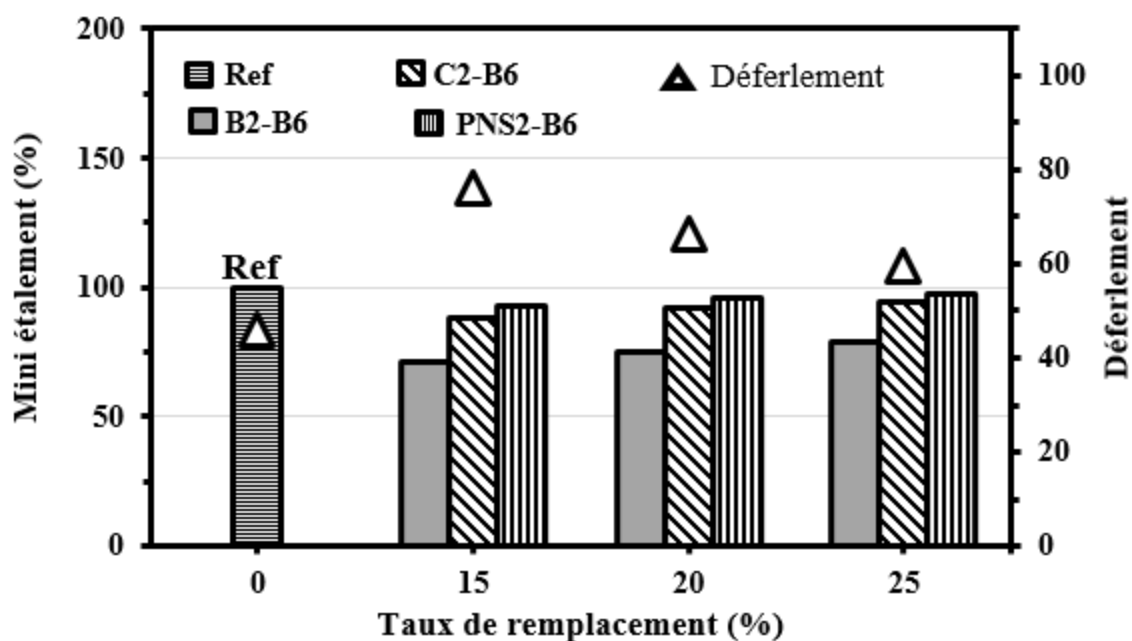


Figure 6.34 : Corrélation entre le mini-étalement des MBE-SAP pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre

6.6.3 Rétention de la fluidité et la dispersibilité de la poudre verre

La Figure 6.35 montre la corrélation entre la rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE destinés aux infrastructures et la dispersibilité de la poudre de verre. Bien que la rétention de la fluidité dépend de l'efficacité de superplastifiant utilisé et de sa compatibilité avec le ciment, on peut tout de même noter qu'une faible dispersibilité correspond à un bon maintien de la fluidité dans le temps surtout avec la combinaisons C2-B6.

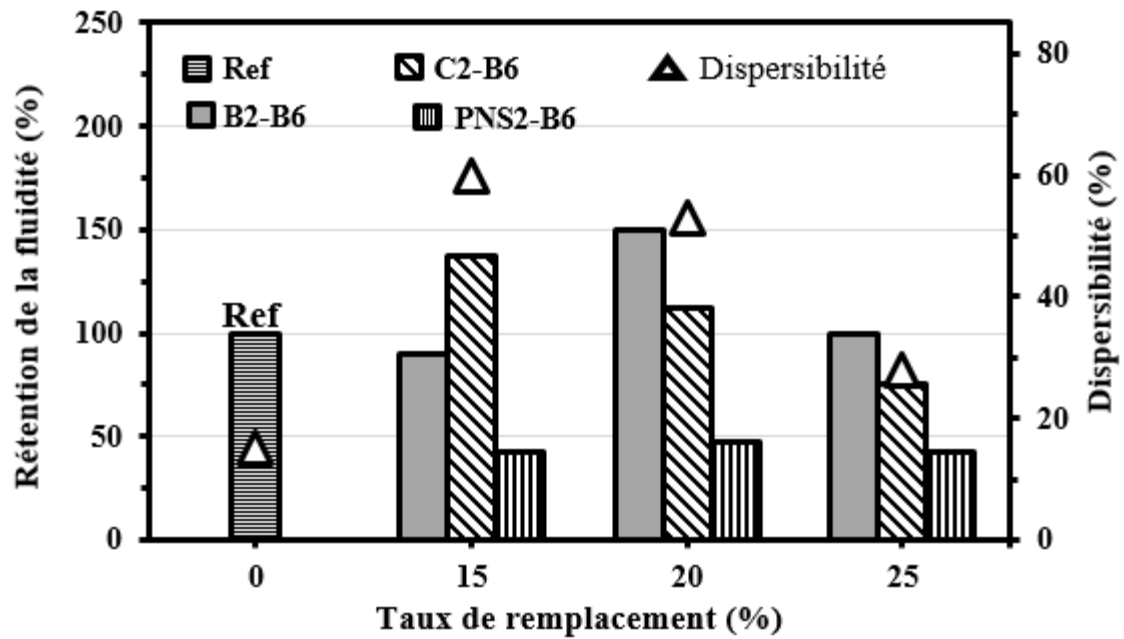


Figure 6.35 : Corrélation entre la rétention de la fluidité entre 10 et 40 min des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre

6.6.4 Temps d'écoulement, T40 et la dispersibilité de la poudre verre

La Figure 6.36 montre la corrélation entre le temps d'écoulement T40 des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre. Les résultats obtenus montrent que le temps d'écoulement T40 dépend fortement de la dispersibilité de poudre de verre. De ce fait on en déduit que plus la dispersibilité de poudre est faible meilleur sera le temps d'écoulement T40 du mélange, c'est-à-dire que la sera plus faible viscosité.

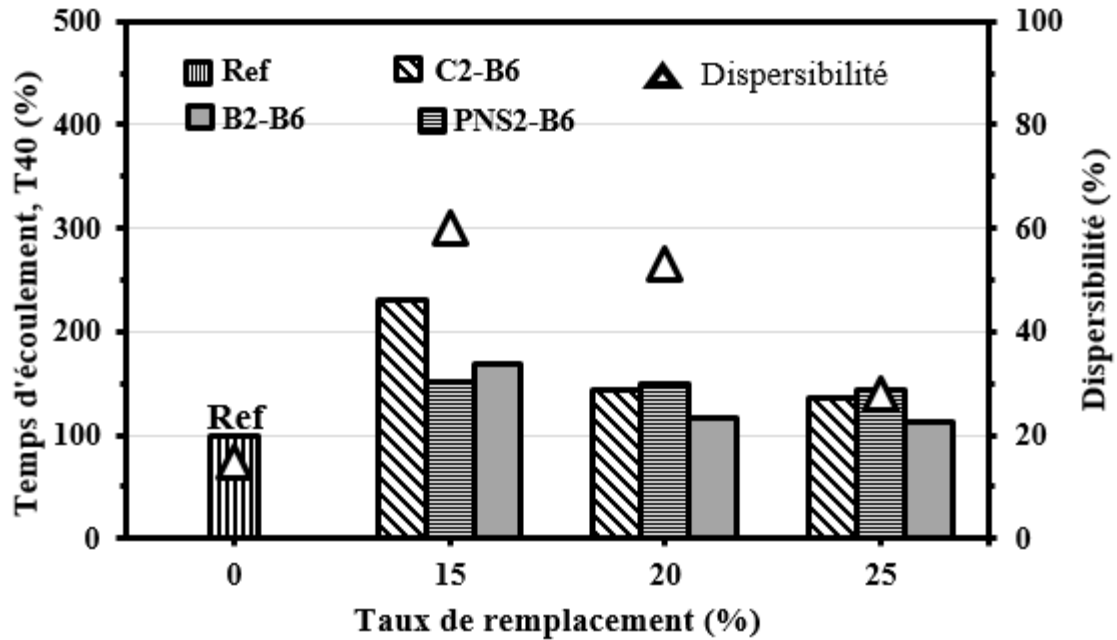


Figure 6.36 : Corrélation entre le temps d'écoulement T40 des MBE-SAP pour l'infrastructure et dispersibilité de la poudre de verre

6.6.5 Temps d'écoulement, T40 et le déferlement de la poudre verre

La Figure 6.37 représente la corrélation entre le temps d'écoulement T40 des MBE destinés pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre. On observe que le temps d'écoulement T40 dépend de déferlement de la poudre de verre. On en déduit que plus le déferlement de la poudre est faible meilleur sera le temps d'écoulement du mélange incorporant la poudre de verre.

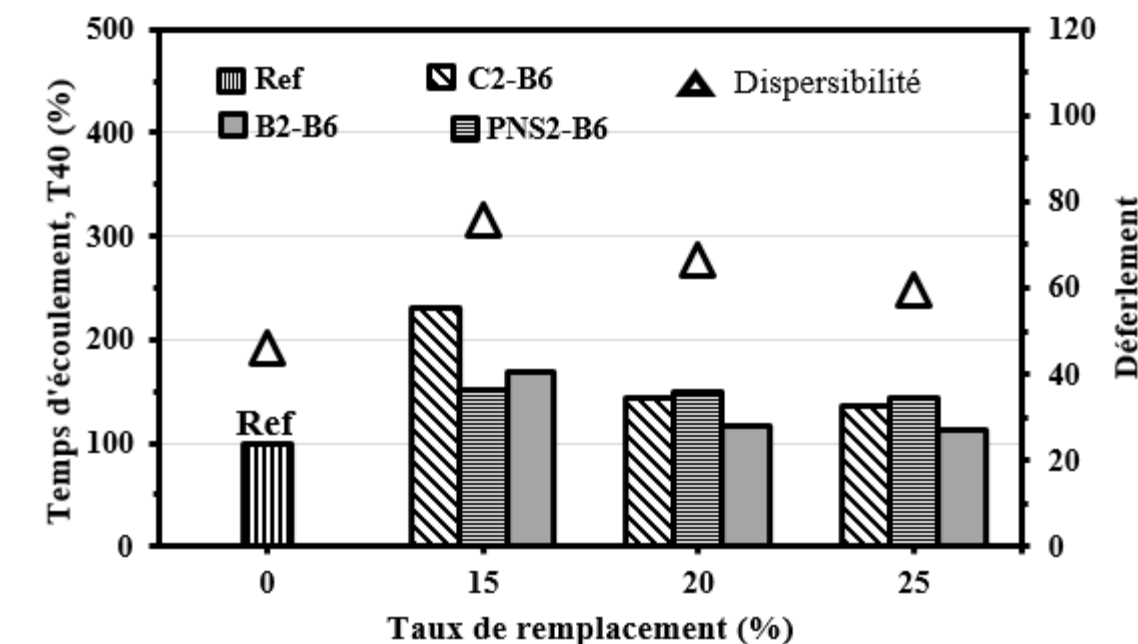


Figure 6.37 : Corrélation entre le temps d'écoulement T40 des MBE-SAP pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre

6.6.6 Temps d'écoulement à travers le V-funnel et la dispersibilité de la poudre de verre

La Figure 6.38 montre la corrélation entre le temps d'écoulement à travers le mini-V-funnel des MBE pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre. On remarque qu'une faible dispersibilité de poudre verre entraine une bonne facilité de passage sans blocage à travers le mini V-funnel et par conséquent, résulte en un temps d'écoulement court. Cependant, une forte dispersibilité entraine soit un temps d'écoulement long ou soit un blocage. Avec les MBE-SAP pour les infrastructures incorporant de la poudre de verre au-delà de 60% de dispersibilité si l'efficacité du superplastifiant utilisé n'est pas très satisfaisante et compatible avec le liant utilisé le blocage survient. Toutefois on peut noter que parmi les combinaisons utilisées pour les infrastructures seul le mélange avec la combinaison C2-B6, a donné une bonne facilité de passage sans blocage à travers le mini V-funnel et l'efficacité de cette combinaison survient à un taux de remplacement de 20% et 25% de remplacement.

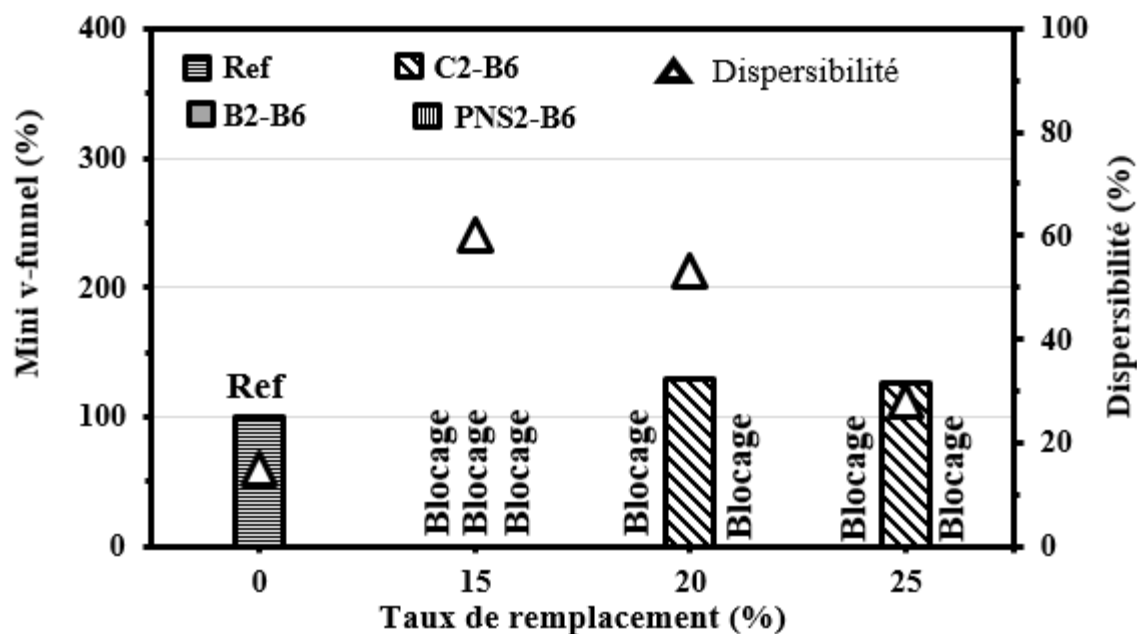


Figure 6.38 : Corrélation entre le temps d'écoulement à travers le mini-V-funnel des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre

6.6.7 Temps d'écoulement à travers le V-funnel et le déferlement de la poudre de verre

La Figure 6.39 illustre la corrélation entre le temps d'écoulement à travers le mini-V-funnel des MBE-SAP pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre. On constate qu'un faible déferlement de la poudre verre entraine une bonne facilité de passage sans blocage à travers le mini-V-funnel. Cependant, un fort déferlement entraine soit un temps d'écoulement long ou soit un blocage cela dépend de l'efficacité de la combinaison SP-AE utilisée mais aussi de la compatibilité entre le superplastifiant utilisé et le type de liant utilisé. Par exemple, comme dans le cas de la dispersibilité de la poudre de verre, les MBE-SAP pour l'infrastructure incorporant la poudre de verre ont un seuil d'indice déferlement de 80. Au-delà de ce seuil, si l'efficacité du superplastifiant utilisé n'est pas très satisfaisante et compatible avec l'ajout utilisé le blocage survient.

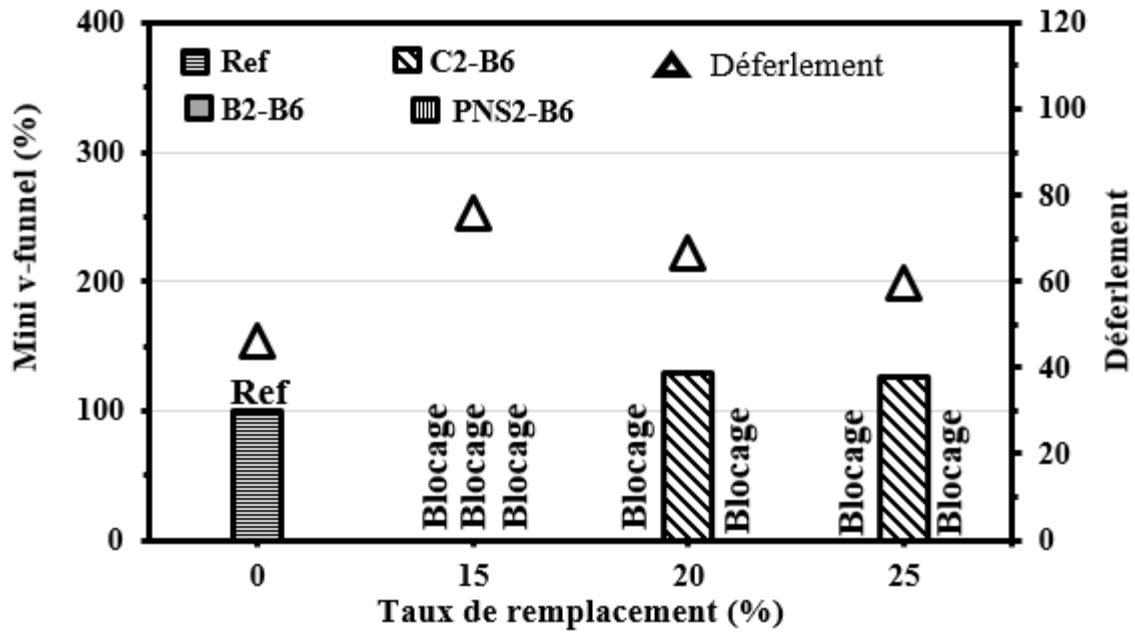


Figure 6.39 : Corrélation entre le temps d'écoulement à travers le mini-V-funnel des MBE-SAP pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre

6.6.8 Seuil de cisaillement et la dispersibilité de la poudre de verre

La Figure 6.40 illustre le seuil de cisaillement des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre. On remarque que la dispersibilité de la poudre de verre affecte le seuil de cisaillement. Cependant, pour le mélange avec les combinaisons C2-B6 et B2-B6, le seuil de cisaillement diminue avec la diminution de la dispersibilité et l'augmentation du taux de remplacement de la poudre verre. Sauf pour le mélange avec la combinaison PNS2-B6 on constate que la dispersibilité de poudre n'affecte le seuil de cisaillement. De ce fait, on en déduit que plus la dispersibilité de la poudre de verre est faible et plus le seuil de cisaillement de mélange à base de polycarboxylate (PC) diminue.

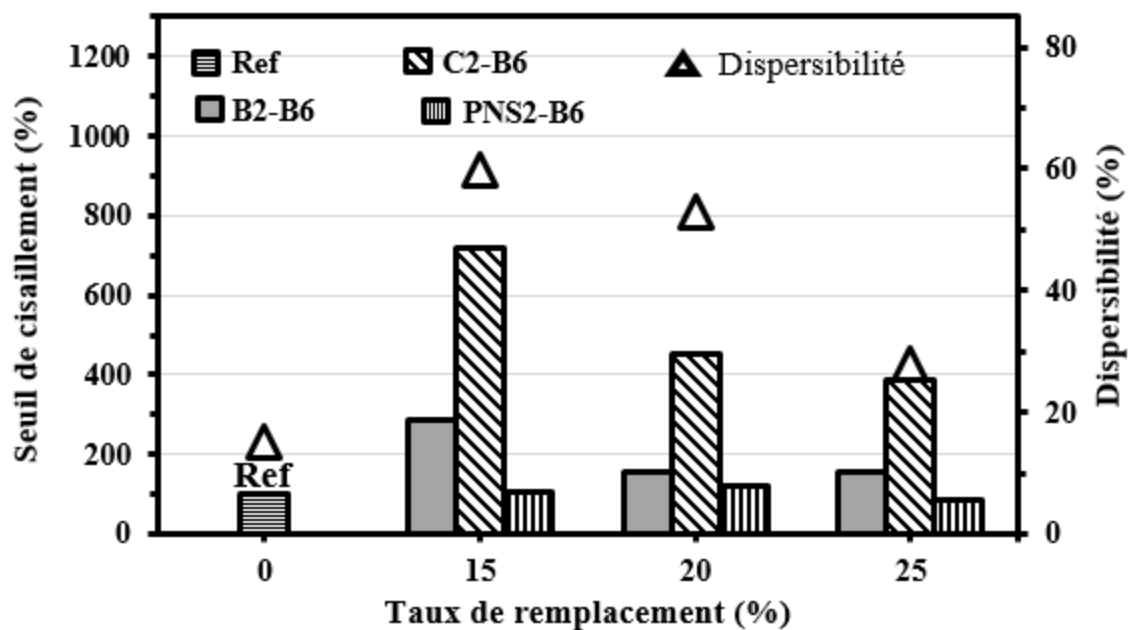


Figure 6.40 : Corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre

6.6.9 Seuil de cisaillement et la coulabilité de la poudre de verre

La Figure 6.41 montre le seuil de cisaillement des MBE-SAP pour l'infrastructure et la coulabilité de la poudre de verre. On constate qu'une diminution de la coulabilité de la poudre de verre avec une réduction de seuil de cisaillement. Il faut toutefois noter qu'à 20% et 25% de remplacement de poudre de verre, la coulabilité de la poudre est constante mais on observe tout de même une légère diminution de seuil de cisaillement. Dans ce cas il est probable que le type de SP à un effet plus important sur le seuil.

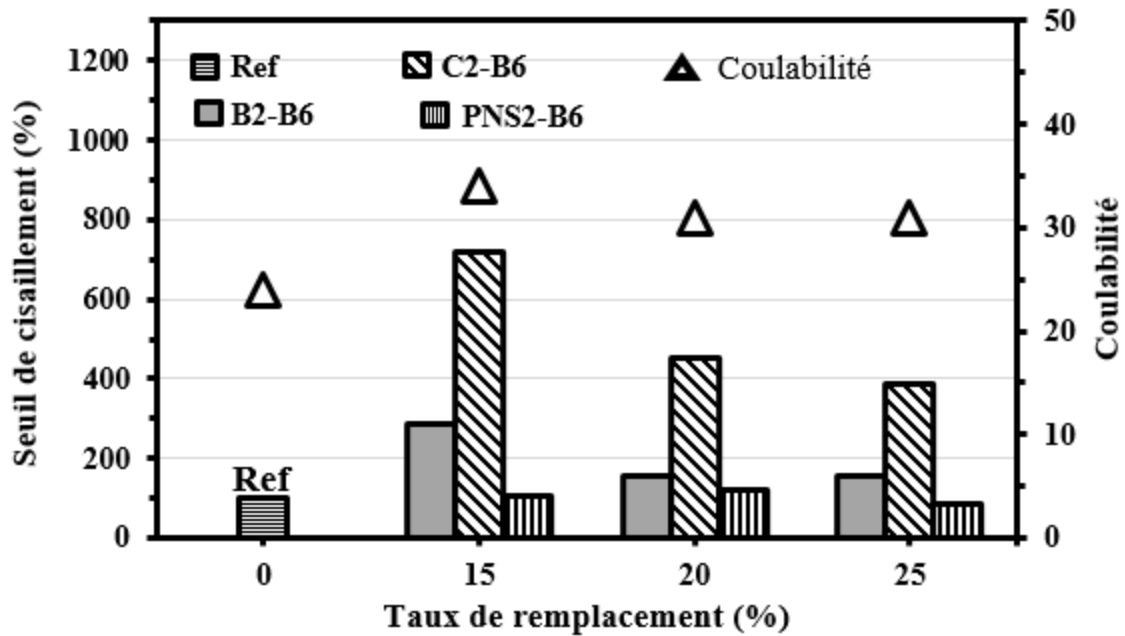


Figure 6.41 : Corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE-SAP pour l'infrastructure et la coulabilité de la poudre de verre

6.6.10 Seuil de cisaillement et le déferlement de la poudre de verre

La Figure 6.42 montre la corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE-SAP pour l'infrastructure et la coulabilité de la poudre de verre. On observe que le déferlement de la poudre de verre influence le seuil de cisaillement des mélanges. On remarque que plus le déferlement de poudre est faible plus le seuil de cisaillement du mélange incorporant la poudre de verre diminue sauf pour le mélange avec la combinaison PNS2-B6 le déferlement de la poudre n'a pas d'effet notable sur le seuil de cisaillement.

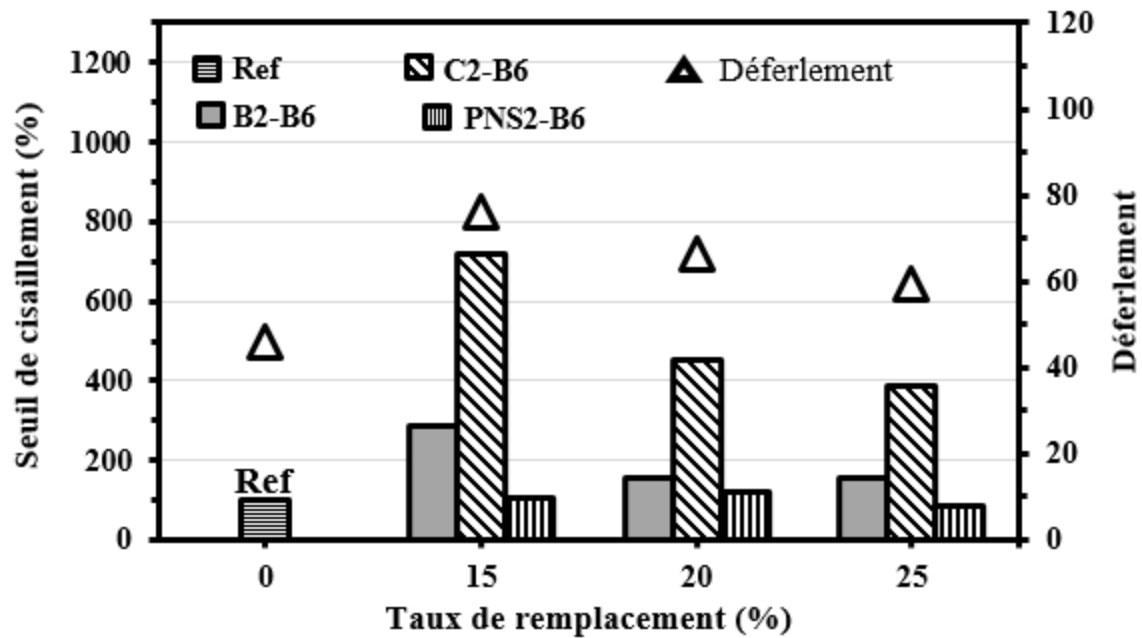


Figure 6.42 : Corrélation entre le seuil de cisaillement des MBE-SAP pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre

6.6.11 Viscosité et la dispersibilité de la poudre de verre

La Figure 6.43 montre la corrélation entre la viscosité de MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre. On remarque que pour le mélange avec les combinaisons PNS2-B6 et C2-B6 la dispersibilité de poudre ne semble pas affecter la viscosité plastique du mélange. Par contre en présence de la combinaison B2-B6 une légère augmentation de la viscosité a été enregistrée avec la diminution de la dispersibilité de la poudre de verre.

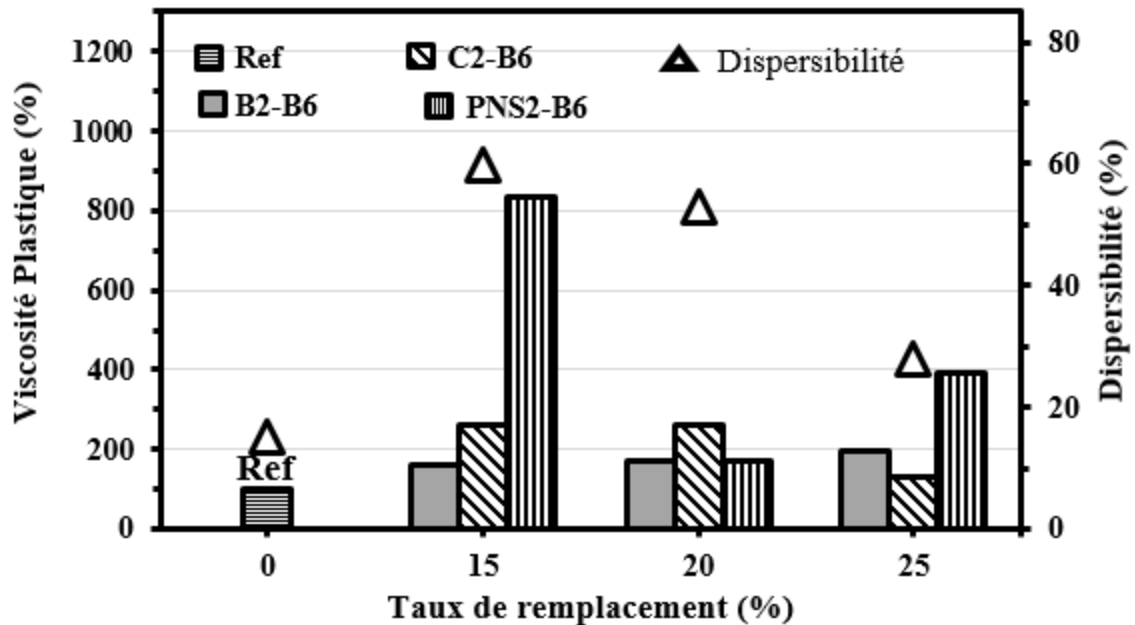


Figure 6.43 : Corrélation entre la viscosité des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre

6.6.12 Résistance a la compression et la dispersibilité de poudre de verre

Les Figures 6.44 et 6.45 illustrent la corrélation entre la résistance à la compression (f_c) à 1 jour et 3 jours des MBE-SAP pour l'infrastructure et la dispersibilité de la poudre de verre. On observe que la dispersibilité de la poudre de verre peut affecter la résistance à la compression des mélanges binaire pour l'infrastructure à jeune âge. Il semble que plus la dispersibilité de la poudre verre est importante plus grand sera la résistance à la compression à jeune âge. Il faut toutefois noter que cette influence peut être causée par l'ajout de matériaux cimentaire faiblement réactif.

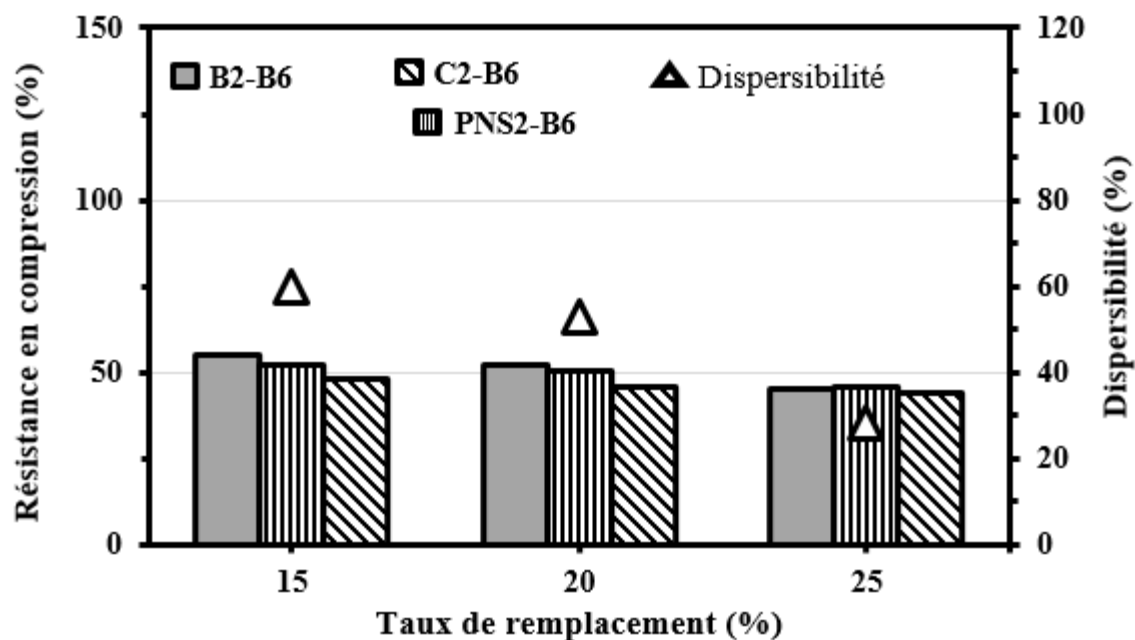


Figure 6.44 : Corrélation entre la résistance à la compression (f'_c) à 1 jour des MBE-SAP pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre

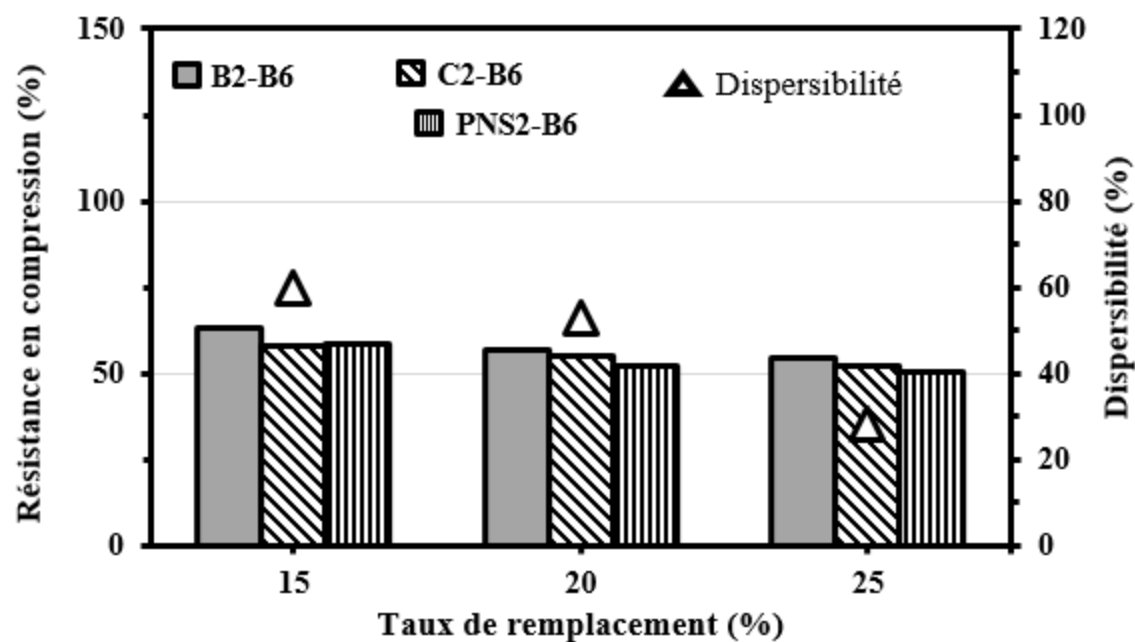


Figure 6.45 : Corrélation entre la résistance à la compression (f'_c) à 3 jour des MBE-SAP pour l'infrastructure et le déferlement de la poudre de verre

Chapitre 7 : Conclusions et recommandations

L'objectif général de ce projet de recherche est de comprendre l'effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA). Ce projet vise la conception d'une nouvelle gamme de béton semi-autoplaçant à rhéologie adaptée exigeant une vibration minimale pour des constructions résidentielles et pour les infrastructures.

Les études réalisées au cours de ce projet sont divisées en trois phases. L'objectif de la première partie est de réaliser une caractérisation approfondie de la phase solide (ciment, liants cimentaires et liants alternatifs) en plus de la caractérisation conventionnelle habituelle, notamment la granulométrie ainsi que les surfaces spécifiques BET et Blaine. La caractérisation approfondie consiste à réaliser des mesures de la coulabilité et de déferlement des poudres. Ces indices sont calculés à partir de la compressibilité, l'agglomération et la cohésion de la poudre, qui sont déterminées à partir des indices de Carr en utilisant l'appareil Hosokawa.

Un protocole de mesure optimale pour déterminer les caractéristiques des poudres est proposé. Ce protocole est employé pour caractériser les poudres étudiées.

7.1 Phase 1 : Caractérisation des ciments, ajouts cimentaires et liants alternatifs

Les résultats obtenus dans le cadre des travaux de la Phase 1 (Caractérisation des ciments, ajouts cimentaires et liant alternatifs) montrent que :

- Les mesures des angles (angle de repos, angle spatule, angle de chute, angle des différences) en condition statique et dynamique ont montré que la différence est minime pour toutes les poudres.
- Les résultats de la compressibilité montrent que l'ensemble des ciments (Figure 4.5) et ajouts cimentaires (Figure 4.6) étudiés ont un caractère compressif.
- La dispersibilité des poudres est liée à la cohésion de la poudre. Plus la cohésion de la poudre est grande, plus faible sera la dispersibilité des poudres.

- Les indices d'écoulement ont montré que la poudre de verre, les cendres volantes, le laitier et la fumée de silice présentent une bonne dispersibilité et une bonne coulabilité.

Par ailleurs, dans le cas de caractérisation des combinaisons binaires des poudres les résultats montrent que :

- Le remplacement de ciment par de la poudre de verre diminue considérablement la cohésion par rapport à 100% de ciment GU. La plus grande diminution a été observée avec le taux de remplacement de 20%.
- Plus le taux de remplacement de la poudre de verre augmente, plus la densité apparente diminue et la compressibilité augmente légèrement.

7.2 Phase 2 : Optimisation des formulations de BFRA de référence

L'objectif de la phase 2 est d'optimiser les formulations de différents types des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA) incorporant différents types de superplastifiant et agents entraîneur d'air (SP/AE). Dans cette phase d'optimisation, nous avons évalué la compatibilité et l'efficacité de différentes combinaisons SP/AEA pour la formulation des BFRA. Des combinaisons SP/AEA compatibles et efficaces en termes de la rhéologie et de son maintien dans le temps ainsi que des propriétés mécaniques pour la formulation des BFRA sont identifiées. Deux différentes classes de BFRA sont considérées dans cette étude. Il s'agit des bétons semi-autoplaçant (BSAP) pour les applications résidentielles et infrastructures. Il est important de rappeler que les BSAP résidentiels sont proportionnés avec deux rapports Eau/Liant (E/L) de 0,50 et 0,55, et que les BSAP optimisées pour les infrastructures sont proportionnés avec deux rapports E/L de 0,38 et 0,40. Les BFRA étudiés sont formulés avec un liant ternaire constitué approximativement de 75% de ciment GU, 20% de cendres volantes et 5% de fumée de silice (Terc³).

Les résultats obtenus dans le cadre de ces travaux d'optimisation permettent de dresser les observations suivantes :

- Pour chaque classe de BFRA étudiée, les combinaisons SP/AE optimums sont identifiées.
- L'efficacité des systèmes PC/AE ou PNS/AE est fonction du type et des dosages utilisés. Elle est également fonction du type de BFRA, notamment le rapport Eau/Liant (E/L).
- Les dosages du couple SP/AE nécessaires pour atteindre la fluidité et la teneur en air visées selon le type de BFRA sont déterminés. Pour le BSAP résidentiel ($E/L = 0,50$, $S/G = 0,55$ et une teneur en liant de 360 kg/m^3), l'efficacité des combinaisons SP/AE est comme suit : PC-A2 (0,37%) > PC-A1 (0,44%) > PC-B3 (0,52 %) > PC-B1 (0,67 %) > PNS1 (0,95 %) > PNS2 (1,02 %).
- Pour le BSAP résidentiel ($E/L = 0,55$, $S/G = 0,55$, une teneur en liant de 340 kg/m^3), l'efficacité des combinaisons SP/AE est comme suit : PC-A2 (0,37%) > PC-A1 (0,44%) > PC-B3 (0,52 %) > PC-B1 (0,67 %) > PNS1 (0,95 %) > PNS2 (1,02 %).
- Pour le BSAP pour les infrastructures ($E/L = 0,38$, $S/G = 0,55$, une teneur en liant de 475 kg/m^3 et un volume de pâte de 34%), l'efficacité des combinaisons SP/AE est comme suit : PC-A2 (0,38%) > PC-B2 (0,33%) > PC-A1 (0,49%) > PC-C2 (0,74%) > PNS2 (1,07%).
- Pour le BSAP pour les infrastructures ($E/L = 0,40$, $S/G = 0,55$ et une teneur en liant de 420 kg/m^3 , un volume de pâte de 31%), l'efficacité des combinaisons SP/AE est comme suit : PC-B2 (0,37%) > PC-A2 (0,35 %) > PC-A1 (0,47%) > PC-C2 (0,6%) > PNS2 (1,13%).

La rétention de la fluidité dans le temps peut varier significativement d'une combinaison (SP/AE) à l'autre. L'efficacité des différentes combinaisons étudiées en termes du maintien de la fluidité est donnée ci-dessous (efficacité décroissante) :

- BSAP résidentiel ($E/L = 0,50$, $S/G = 0,55$ et une teneur en liant de 360 kg/m^3) : PNS2 (1,02%) > PC-B1 (0,67%) > PC-A2 (0,37%) > PNS1 (0,95 %) > PC-B3 (0,52) > PC-A1 (0,44 %).

- BSAP résidentiel ($E/L = 0,55$, $S/G = 0,55$ et une teneur en liant de 340 kg/m^3) : PC-A2 (0,23 %) \approx PNS2 > PC-B1 (0,49%) > PC-A1 (0,35%) > PC-B3 (0,44 %) > PNS1 (0,88).
- BSAP pour les infrastructures ($E/L = 0,38$, $S/G = 0,55$ et une teneur en liant de 475 kg/m^3 , un volume de pâte de 34%) : PC-C2 (0,74 %) > PNS2 (1,07 %) > PC-A2 (0,38 %) > PC-B2 (0,33 %) > PC-A1 (0,49 %).
- BSAP pour les infrastructures ($E/L = 0,40$, $S/G = 0,55$, une teneur en liant de 420 kg/m^3 et un volume de pâte de 31%) : PC-C2 (0,60 %) > PNS2 (1,13) > PC-B2 (0,37 %) \approx PC-A2 (0,35 %) > PC-A1 (0,47 %).

7.3 Phase 3 : Effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des BFRA

L'objectif des activités de la phase 3 est d'évaluer l'effet des caractéristiques des liants et liants alternatifs (Phase 1) sur la rhéologie et son évolution dans le temps, les propriétés au jeune âge, les propriétés mécaniques, de différents types de BFRA. Les essais expérimentaux de la troisième phase de ce projet sont réalisés sur des MBE. Pour chaque type de BFRA étudiés, la formulation du MBE correspondante est déterminée. Les MBE semi auto plaçant destinés pour les applications résidentielles et le MBE semi auto-plaquant destinés pour les infrastructures.

Les résultats de la phase 3 montrent que :

- La dispersibilité, la cohésion et le déferlement des poudres affectent la fluidité des mélanges incorporant la poudre de verre.
- Plus le temps d'écoulement T40 et le déferlement de poudre sont faibles, meilleur sera la fluidité du mélange incorporant la poudre de verre.
- Une faible dispersibilité et déferlement de poudre verre entraîne une bonne facilité de passage sans blocage à travers le mini V-funnel et, par conséquent, un temps

d'écoulement court est observé. En revanche, une forte dispersibilité entraîne soit un temps d'écoulement long ou soit un blocage dépendamment de la combinaison utilisée.

- Pour les MBE-SAP résidentiels incorporant la poudre de verre, au-delà de 60% de dispersibilité et pour un indice de déferlement au-delà de 80 si l'efficacité du superplastifiant utilisé n'est pas très satisfaisante le blocage survient.
- La dispersibilité de la poudre de verre affecte le seuil de cisaillement. Plus la dispersibilité de la poudre est faible, plus le seuil de cisaillement diminue.
- Dans les cas des MBE-SAP résidentiels contenant 15, 20 et 25% de la poudre de verre les résultats montrent que la viscosité de mélange avec la combinaison PNS2-B6 à base de polynaphtalène est plus influencée par la dispersibilité de la poudre de verre que le mélange à base de polycarboxylate (PC-B1-B6 et PC-A2-A4). Il faut toutefois noter que l'influence de la dispersibilité de poudre verre sur la viscosité plastique dépend aussi du taux de remplacement de la poudre de verre.
- La dispersibilité de la poudre de verre semble avoir une influence sur la résistance à la compression des mélanges binaire résidentiels et d'infrastructure. Cependant, plus la dispersibilité de la poudre verre est importante plus grand sera la résistance à la compression à jeune âge.

Afin de mieux comprendre l'effet des caractéristiques des poudres sur la rhéologie des bétons fluides à rhéologie adaptée (BFRA) et de favoriser leur utilisation pour des constructions résidentielles et pour les infrastructures exigeant une vibration minimale. Nous recommandons que cette étude puisse être complétée par :

- Une caractérisation des combinaisons ternaires et quaternaires des poudres.
- Une étude approfondie permettant d'évaluer l'effet des caractéristiques de ces poudres (ternaires et quaternaires) sur la rhéologie et son évolution dans le temps, les propriétés au jeune âge, les propriétés mécaniques, de différents types de BFRA.
- Valider la performance des BFRA formulés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aladdine, F. (2009). Propriétés à l'état frais, à l'état durci et durabilité des bétons incorporant du verre finement broyé. ProQuest Dissertations and Theses. Université de Sherbrooke (Canada).

Bonneau, O. (1997). Étude des effets physico-chimiques des superplastifiants en vue d'optimiser le comportement rhéologique des bétons à ultra-hautes performances.

Bouhamou, N., Belas, N., Mesbah, H., Mebrouki, A., & Ammar, Y. (2008). Étude du comportement à l'état frais des bétons autoplaçants à base de matériaux locaux. Canadian Journal of Civil Engineering, 35(7), 653-662.

BOUNEDJEMA, Y. (2017). Évaluation des modifications mécaniques Et rhéologiques apportées par le sable de concassage aux mortiers et bétons. EZZIANE Karim, HALLAL Ahmed.

Bouzoubaâ, N et Fournier, B (2003) Optimization of fly ash content in concrète Part I: Non-airentrained concrète made without super plasticizer. Cernent and Concrète Research,

CHEKIREB, S. (2015). VALORISATION DE LA POUDRE DE VERRE DANS LE BÉTON AUTOPLAÇANT. UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE.

Codina, M. (2007). Les bétons bas pH-Formulation, caractérisation et étude à long terme. INSA de Toulouse.

Diederich, P. (2010). Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

Diederich, P., Mouret, M., de Ryck, A., Ponchon, F., & Escadeillas, G. (2012). The nature of limestone filler and self-consolidating feasibility—relationships between physical, chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement-based suspension. Powder technology, 218, 90-101.

El Barrak, M. (2003). Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des Bétons Autoplaçants (BAP) à l'état frais. *Revue Française de Génie Civil*, 7(1), 115-115.

El Barrak, M. (2005). Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais", thèse de doctorat, Université Toulouse III – Paul Sabatier

Fahima, R. (2017, Mai). EFFET DES CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES AJOUTS MINÉRAUX SUR LES PROPRIÉTÉS RHÉOLOGIQUES DES MORTIERS DE BÉTONS FLUIDES ÉQUIVALENTS (Thèse de doctorat ès sciences appliquées). Sherbrooke (Québec), Canada, Sherbrooke.

Ferraris, C., & Martys, N. (2001). De la pâte de ciment au béton : modélisation et mesures expérimentales des propriétés rhéologiques. *Proc. Rhéologie Génie Civil et Environment*, 36, 10-12.

Hassan, A. A., Lachemi, M., & Hossain, K. M. (2012). Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete. *Cement and concrete composites*, 34(6), 801-807.

Leclerc (2011). Élaboration des protocoles d'essais, de consolidation et de formulation des bétons semi-autoplaçants pour le bâtiment. Université de Sherbrooke.

Martin, C. (1999). Contribution à la caractérisation des fines minérales et à la compréhension de leur rôle joué dans le comportement rhéologique des matrices cimentaires (THÈSE en COTUTELLE). L'UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE et L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE TOULOUSE.

Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima, M., Okamura, H. (1989) .Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures, *Proceedings of the 2nd East Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*

Paco, D. (2010). Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton (DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE). L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Toulouse.

Pan, J. (2011). Influence des adjuvants chimiques sur la performance des mortiers de béton équivalent à rhéologie adaptée. Université de Sherbrooke.

Petit, J.-Y. (2005). Effet de la température, des superplastifiants et des ajouts sur les variations rhéologiques des micromortiers et bétons auto-compactants.

Schwartzentruber, A., & Catherine, C. (2000). La méthode du mortier de béton équivalent (MBE)—Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés. *Materials and structures*, 33(8), 475-482.

Sotomayor Cruz, C. D. (2012). Développement des bétons semi autoplaçants a rhéologie adaptée pour des infrastructures.

Vikan, H., & Justnes, H. (2007). Rheology of cementitious paste with silica fume or limestone. *Cement and Concrete Research*, 37(11), 1512-1517.